

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do funcionamento de uma fachada de dupla  
pele por processos de ventilação natural. Aplicação a  
um edifício em Lisboa.

Márcia Sofia Gregório Pereira

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2015

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Avaliação do funcionamento de uma fachada de dupla  
pele por processos de ventilação natural. Aplicação a  
um edifício em Lisboa.

Márcia Sofia Gregório Pereira

**Dissertação**

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Orientador: Professor Doutor Fernando Marques da Silva (FCUL)

**2015**

## **Abstract**

This work is based on the evaluation of a double skin façade, naturally ventilated, of an existing building in Lisbon. The selection of this particular building is due to the availability of the data for analysis. The numerical model Ventil was applied to a representative sketch of the façade. Then, the parameters to be used were studied and the simulations were executed. This resulted in a dataset that was later analyzed. The study of this dataset led to the observation of a mix ventilation flow both from wind and irradiation. Both are part of the façade ventilation system. The irradiance promotes a very well defined flux while the wind carries more diversified paths of air due to the different pressure coefficients spread through the facade. The numerical model is very useful for this type of system façade showing useful results to its analysis. It showed some advantages over other models. However, it has limitations considered during the sketch of the façade. The acknowledgement of these limitations allowed the results to be reliable.

**Palavras-chave:** fachada de dupla pele, ventilação natural, física de edifícios, simulação.

## **Resumo**

Este trabalho tem por base a avaliação de uma fachada de dupla pele, ventilada naturalmente, de um edifício existente em Lisboa. A escolha da fachada deve-se à disponibilidade dos dados experimentais para análise. A partir de um esquema representativo da fachada de modo a aplicar o modelo numérico integral Ventil. De seguida estudaram-se os parâmetros a introduzir para realizar as simulações das quais se obtiveram os resultados analisados. Através do estudo efetuado foi possível analisar as componentes dos caudais de ventilação devidos à ação do vento e da radiação incidente na fachada, dado que ambos compõem o regime de ventilação da fachada. A irradiância promove um caudal bastante definido enquanto o efeito do vento produz fluxos de ar mais diversificados devido aos diferentes coeficientes de pressão da fachada. O modelo numérico utilizado devolveu dados muito úteis na análise deste tipo de fachada. Apresenta algumas vantagens relativamente a outros modelos, no entanto, tem igualmente determinadas limitações que foram consideradas inicialmente quando se realizou o esquema da fachada. O conhecimento destas limitações permitiu que as mesmas não tivessem grande influência sobre os resultados obtidos.

**Keywords:** double skin facade, natural ventilation, building physics, simulation.

# 1. Índice

1.	Introdução	1
2.	Fachadas de dupla pele	2
2.1	Tipos de fachadas de dupla pele	2
2.2	Vantagens e Desvantagens	5
3.	Camada Limite Atmosférica	6
3.1	Camada Limite Urbana	6
3.1.1	Lei de Potência	6
3.1.2	Perfil da Camada Limite Urbana	6
4.	Ventilação Natural	8
4.1	Processos indutores	8
4.2	Componente Térmica	9
4.2.1	Componente eólica	9
4.2.1	Perdas de carga	9
5.	Programa de cálculo – Ventil.for	10
5.1	O algoritmo	10
5.1.1	Equação da continuidade	10
5.1.2	Equação da quantidade de movimento	11
5.1.3	Equação da Energia	11
5.2	Breve descrição do programa	12
6.	Caso de estudo: Edifício H – <i>Office Park Expo</i>	12
6.1	Constituição da fachada	14
6.2	Vidro interior e exterior	14
6.3	Canal ventilado da fachada dupla	15
7.	Dados do vento	16
7.1	Correção da velocidade do vento	16
7.1.1	Características Locais	17

7.1.2	Direção Noroeste-Sudoeste e Nordeste-Sudeste	17
7.1.3	Direção Sul	17
7.1.4	Direção Norte	17
7.2	Conjunto dos resultados finais	17
7.3	Correção do vento de acordo com a orientação da fachada em estudo	18
8.	Coeficientes de pressão $c_p$	18
8.1	Situações Particulares	19
9.	Correção da irradiância	20
9.1	Valores da irradiância em falta	20
9.1.1	Radiação incidente num plano inclinado	20
9.1.2	Radiação direta e difusa	21
9.1.3	Altura Solar	21
9.1.4	Declinação Solar	21
9.1.5	Ângulo Horário	21
9.1.6	Hora Solar Aparente	22
9.1.7	Equação do Tempo	22
9.1.8	Projeção dos raios solares sobre a normal da superfície	22
9.1.9	Azimute do Sol	22
9.1.10	Validação dos resultados	22
9.2	Dados incompletos	23
10.	O modelo	25
10.1	Modelo simplificado	25
10.1.1	Dados Utilizados	28
10.1.2	Resultados obtidos	32
11.	Simulação: modelos utilizados	33
11.1	Modelo do período da manhã	34
11.2	Modelo do período da tarde	34

12.	Resultados	35
12.1	Efeito do vento	35
12.2	Parâmetro de potência adimensional PSI ( $\Psi$ )	36
12.3	Efeito da irradiância	37
12.4	Temperatura interior da fachada de dupla pele	37
12.5	Influência do caudal	38
12.6	Caudal Horizontal	39
12.7	O edifício e a orientação das fachadas	42
12.8	Validação dos resultados	42
13.	Discussão dos resultados	44
14.	Conclusão	46
15.	Referências	47
16.	Anexos	49
16.1	Anexo 1: Coeficiente $c_p$ bibliografia	49

## 2. Índice de figuras

Figura 1 - Modos de ventilação: a), b), c), d), e).	3
Figura 2 - Fachada do tipo modular e multi-piso (Poirazis 2006).	3
Figura 3 - Fachada tipo chaminé (Poirazis 2006).	4
Figura 4 - Fachada do tipo corredor.	4
Figura 5 - Fachada tipo tampão (adaptada de Boake 2014).	5
Figura 6 - Razão entre a área média das fachadas e a área total em planta (Silva 2012).	7
Figura 7 - Edifício H – <i>Office Park Expo</i> (Facal n.d.).	13
Figura 8 - Dispositivos de monitorização colocados na fachada. (Facal n.d.)	14
Figura 9 – Desenho ilustrativo do perfil da fachada do exterior para o interior (à esquerda o piso inferior; à direita o piso superior).	14
Figura 10 - Localização do anemómetro em relação ao edifício em estudo. (Google 2014)	16
Figura 11 - Exemplo da estimativa dos coeficientes de pressão através da interpolação linear.	19
Figura 12 - Exemplo da incidência do vento num edifício onde ocorre bolha de recirculação do ar (McLoughlin, Laramée and Zhang 2010).	19
Figura 13 - Exemplo da incidência do vento 68°.	20

Figura 14 - Perfil de sombreamento da fachada SE num dia de céu nublado (Inverno 09-12-2009).	23
Figura 15 - Perfil de sombreamento da fachada SE num dia de céu limpo (Inverno 02-02-2010).	24
Figura 16 - Representação da fachada NE.	25
Figura 17 - Representação da fachada SE.	26
Figura 18 - Representação da fachada SO.	26
Figura 19 - Representação da totalidade do edifício vista sendo que à esquerda está a fachada orientada a NE.	27
Figura 20 - Esquema do modelo simplificado para as fachadas SO/NE do exterior para o interior (dimensões não proporcionais).	28
Figura 21 - Representação das três frentes em estudo correspondentes, respetivamente, às fachadas orientadas a NE, SE, SO.	34
Figura 22 - Representação das três frentes em estudo correspondentes, respetivamente, às fachadas orientadas a NE, SE, SO.	34
Figura 23 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada em função da velocidade do vento.	35
Figura 24 - Variação do PSI em função da velocidade do vento e da irradiância.	36
Figura 25 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada, em função da irradiância e da velocidade do vento. (Primavera, céu nublado, 9:30 horas; Outono, céu limpo, 10:00 horas; Verão, céu limpo, 17:00 horas; Inverno, céu nublado, 21:00 horas).	37
Figura 26 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior.	38
Figura 27 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior, em função do caudal (Caso 3).	39
Figura 28 - Caudal horizontal do Caso 1 – incidência 346° (Os símbolos positivos representam a entrada de ar no compartimento assinalado e os sinais negativos representam a sua saída).	39
Figura 29 - Caudal horizontal do Caso 2 – incidência 329°.	40
Figura 30 - Caudal horizontal do caso 3 - incidência 190°.	41
Figura 31 - Fluxo horizontal do caso 4 - incidência 217°.	41
Figura 32 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada em função do PSI.	42
Figura 33 – Comparação dos $\Delta T$ do Ventil e de campanha, em cada espaço da fachada por caso de estudo.	43
Figura 34 - Variação da temperatura em relação à temperatura exterior em cada espaço da fachada atrás do sombreador.	44

### 3. Índice de tabelas

Tabela 1 - Tipo de escoamento numa camada limite urbana (Silva 2012).	7
---	---

Tabela 2 - Intervalos temporais de campanha (Facal n.d.)	13
Tabela 3 - Detalhes técnicos do vidro exterior (FACAL n.d.).	15
Tabela 4 - Características do vidro interior duplo (FACAL n.d.).	15
Tabela 5 - Características óticas do conjunto sem sombreamento (Silva et al. 2007).	15
Tabela 6 - Características óticas do conjunto com sombreamento (Silva et al. 2007).	15
Tabela 7 - Velocidades do vento consideradas.	17
Tabela 8 - Dados do edifício para consulta dos coeficientes de pressão na bibliografia.	18
Tabela 9 - Dados dos espaços utilizados na simulação.	28
Tabela 10 - Dados dos elementos da fachada.	29
Tabela 11 - Dados dos fatores externos constantes (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985).	29
Tabela 12 - Tabela síntese dos parâmetros utilizados.	29
Tabela 13 - Dados referentes às paredes não adiabáticas.	32
Tabela 14 - Resultados obtidos com o modelo simplificado.	32
Tabela 15 - Horário do funcionamento automático do sombreador.	33

## 4. Lista de abreviaturas e símbolos

### Abreviaturas

APL	Área em planta do espaço
AST	Hora Solar Aparente
BBRI	Belgium Building Research Institute
CCU	Camada de Cobertura Urbana
CLA	Camada Limite Atmosférica
DELT	Variação da temperatura
DSF	Double Skin Facade
DST	Daylight Saving Time
ET	Equação do tempo
FDP	Fachada de dupla pele
IAPACO	Índice do Ventil referente à temperatura
ICPCO	Índice do Ventil referente à pressão do espaço
IHCO	Índice do Ventil referente a aberturas intercomunicantes
N	Número de incógnitas
n.d.	Não disponível
NA	Número de aberturas
NESP	Número de espaços internos
PSI	Parâmetro de potência adimensional
REN	Renovações por hora

### Constantes

Fr	Número de Froude
k	Constante de Von Kármán
Re	Número de Reynolds



## Índices

ad	Adiabático
i	Espaço interno
imp	Impulsão
J	Índice do nível do espaço
k	Abertura
ref.	Valor de referência
sky	Céu
solo	Solo
u	Urbana

## Símbolos

A	Área	m <sup>2</sup>
a	Azimute da superfície	rad
a <sub>n</sub>	Valor em função da visibilidade atmosférica	-
b <sub>n</sub>	Valor em função da visibilidade atmosférica	-
c <sub>p</sub>	Coeficiente de pressão	-
C <sub>d</sub>	Coeficiente de descarga	-
d	Deslocamento	m
D	Radiação difusa	W/m <sup>2</sup>
F	Fator de forma	
g	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
G	Radiação Global	W/m <sup>2</sup>
H	Altura média	m
h	Coeficiente global de transferência de calor	W/m <sup>2</sup> .K
$\overline{h_r}$	Altura média da camada de cobertura urbana	m
h <sub>s</sub>	Altura solar	Graus [°]
I	Radiação incidente numa superfície	W/m <sup>2</sup>
J	Dia juliano	-
J'	Coeficiente do dia juliano	-
K	Radiação direta	W/m <sup>2</sup>
L	Distância entre dois pontos	m
p	Pressão	Pa
$\dot{Q}$	Calor gerado	W
Q	Caudal	m <sup>3</sup> /h
T	Temperatura	K
U	Velocidade do vento	m/s
u <sub>*</sub>	Velocidade de atrito	m/s
x	Distância entre dois pontos	m
z	Cota	m
z <sub>0</sub>	Altura de rugosidade	m

## Símbolos gregos

$\alpha$	Coeficiente de rugosidade	-
$\beta$	Inclinação da superfície	rad
$\gamma$	Expoente / Azimute da superfície	- / rad
$\delta$	Espessura da camada limite / Declinação solar	m / rad
$\zeta$	Coeficiente de perda característico	-
$\theta$	Ângulo de incidência do vento no edifício	Graus [°]
$\lambda$	Tipo de escoamento / Latitude	- / rad

$\mu$	Viscosidade dinâmica	Pa.s
$\rho$	Massa volúmica / albedo do solo	kg/m <sup>3</sup> / -
$\phi$	Ângulo de incidência do vento na torre anemométrica / Azimute do sol / Coeficiente entre as áreas das aberturas	Graus [°] / rad / -
$\Psi$	Parâmetro adimensional de potência PSI	-
$\omega$	Ângulo horário	rad

## 1. Introdução

A partir dos anos 70 cresceu a preocupação com a energia e, posteriormente, com o ambiente, destacando-se mais recentemente a forma como utilizamos e consumimos a energia produzida. Tendo como cenário de enquadramento a utilização racional de energia, pretende-se melhorar o conhecimento do funcionamento de edifícios dinâmicos. É, então, extremamente importante considerar os edifícios com maior consumo energético. Sabendo que os edifícios de serviços são responsáveis por grande parte deste consumo, é de grande interesse a adoção de medidas que permitam uma utilização mais racional da energia. Incluídos neste grupo de edifícios estão os de fachada de dupla pele (DSF, *double skin facade*) cujo projeto e construção visam adaptar o edifício às condições e ambiente que o rodeiam. O estudo deste tipo de edifícios permite corrigir erros cometidos no passado tendo sempre em vista melhores construções para o futuro. Assim, torna-se crucial a fase de investigação deste tipo de edifícios adequada ao clima em que se situam. Esta pesquisa pode definir a forma como futuros edifícios serão projetados e, em particular, no que respeita ao desempenho térmico do edifício ao longo do teu tempo de vida.

O número de edifícios com DSF em Portugal, e em particular em Lisboa, é significativo no entanto, a tecnologia utilizada nestes projetos provém de localizações com condições climáticas diferentes, o que conduz à necessidade de estudos sobre o funcionamento destas fachadas no clima local. Por vezes, a utilização incorreta destes mecanismos pode levar a necessidades de arrefecimento nalgumas estações do ano (devido a sobreaquecimento) ou a necessidades de iluminação artificial (devido à obrigatoriedade de utilizar os mecanismos de sombreamento), perdendo-se o propósito para que foram criadas as DSF.

Este tipo de fachada é caracterizado por, se bem projetado, beneficiar o desempenho energético de qualquer edifício. Isto é, o consumo de energia é reduzido devido à minimização da entrada de radiação solar e consequente redução das necessidades de arrefecimento. Permite igualmente isolamento acústico devido à aplicação da camada exterior de vidro. Esta mesma camada dá ao utilizador a oportunidade de ter as janelas abertas e circulação de ar natural sem que o ruído exterior afete as condições interiores.

A existência de sombreadores garante que a entrada de energia solar é reduzida – quer sejam controlados pelo utilizador ou com subida/descida automáticas. O conforto térmico no interior vai, então, aumentar permitindo ainda maior produtividade. Neste contexto, torna-se fundamental simular o comportamento dos caudais de ar dentro de uma fachada deste género.

O edifício escolhido para análise neste trabalho é tido como um caso de sucesso. O modelo de simulação numérica utilizado é o Ventil, um modelo numérico integral, que permite perceber como se comporta o ar dentro da fachada.

A dissertação aqui apresentada tem por base um trabalho anterior incidente sobre o mesmo tema e com base nos mesmos dados de campanha. Nesse mesmo documento foi avaliado apenas um módulo isolado da fachada recorrendo ao mesmo modelo de cálculo. Pretende-se aqui ampliar os resultados obtidos através de uma simulação completa da fachada tendo em consideração as três frentes sujeitas a diferentes condições climáticas.

O presente estudo inclui uma parte teórica sobre as fachadas de dupla pele e uma descrição da Camada Limite Atmosférica. De seguida é feita uma apresentação do programa de cálculo numérico – Ventil.for. A partir daqui apresenta-se o caso de estudo com o tratamento de todos os dados inerentes e, por fim, as simulações e os resultados obtidos.

## 2. Fachadas de dupla pele

Uma fachada de dupla pele consiste em dois vãos envidraçados separados por uma caixa-de-ar. A estrutura desta fachada é em tudo semelhante à de um vidro duplo, no entanto, o espaço entre os dois vidros simples é tal que permite a circulação do ar.

As duas principais forças por detrás do funcionamento de uma fachada de dupla pele são a ação do vento (eólica) e a influência da irradiação (térmica). Estas forças são independentes mas ambas dão origem às diferenças de pressão criadas na fachada. Como existem estas diferenças de pressão entre as diferentes aberturas dá-se a circulação de ar.

A sua aplicação depende do fim a que se destina, sendo que pode ser conjugado com a ventilação de um edifício através de trocas de energia entre a caixa-de-ar e o interior do edifício. Os principais objetivos de uma fachada deste tipo são a entrada abundante de luz e a criação de uma barreira térmica para proporcionar maior conforto aos que se encontram no interior do edifício.

Jean-Baptiste Jobard é o autor da primeira referência a uma FDP, em 1849 (Poirazis 2006). Este inventor e fotógrafo francês descreveu uma fachada deste tipo referindo que, no Inverno deverá circular ar quente entre dois vãos envidraçados, e no Verão deverá circular ar frio. Apenas em 1903 aparece o primeiro edifício, uma fábrica de brinquedos alemã – Steiff Factory, sendo o principal objetivo aumentar a produtividade da fábrica através do aproveitamento da luz natural. Vários outros projetos foram sendo criados ao longo dos anos até 1930, sensivelmente. Após este período, as fachadas de dupla pele entraram numa fase de estagnação. Mais tarde, a partir dos anos 70, cresce a preocupação com o ambiente aliada ao gosto pela estética e arquitetura e, voltam a utilizar-se este género de fachadas.

### 2.1 Tipos de fachadas de dupla pele

As fachadas de dupla pele podem ser caracterizadas de acordo com o tipo de ventilação, o modo de ventilação e a configuração da fachada.

Quanto ao tipo de ventilação, esta pode ser natural, mecânica ou híbrida (conjugação dos dois anteriores).

Relativamente ao modo de ventilação, foram criadas categorias pela Battle McCarthy, empresa de engenharia ambiental na Grã-Bretanha. Estas categorias foram também mencionadas por Perino em 2008 a partir do programa Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) da Agência Internacional da Energia. Este foi elaborado pelo Belgium Building Research Institute (BBRI):

- Sistema de exaustão onde a fachada permite a remoção do ar interior, Fig. 1 a);
- Sistema de admissão onde a fachada fornece o ar para o interior, Fig. 1 b);
- Sistema de fluxo de ar reversível ou variável onde se combinam os dois modelos anteriores (exaustão e admissão) sendo regulados de acordo com as condições interiores – pelos utilizadores – ou através de dispositivos de controlo, Fig. 1 c);
- Cortina de ar exterior onde o ar exterior circula dentro da fachada sem comunicação com o interior do edifício, isto é, o ar circulante é proveniente do exterior e é para aí que é reenviado, Fig. 1 d);
- Cortina de ar interior onde apenas circula na fachada o ar do interior do edifício não havendo comunicação com o exterior. Não existe qualquer comunicação com o exterior, Fig. 1 e);

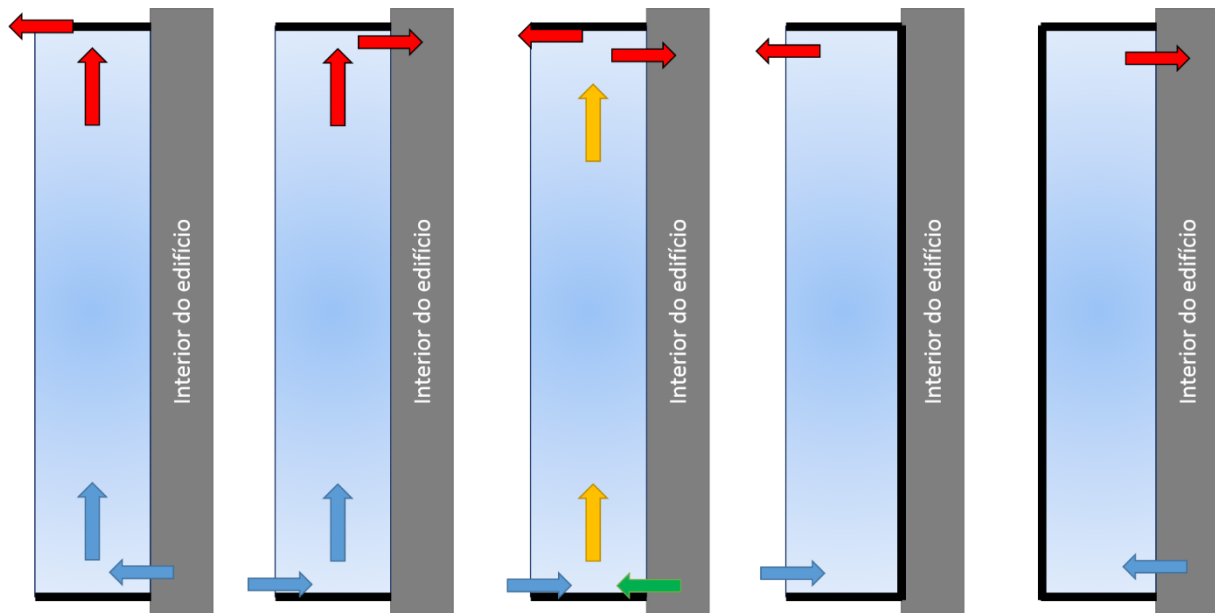


Figura 1 - Modos de ventilação: a), b), c), d), e).

Esta classificação é dada de acordo com a forma como a cavidade se encontra dividida.

- Modular (*Box window*): partições horizontais (em cada piso) e verticais (em cada janela) dividem a fachada em pequenas caixas nas quais as entradas e saídas de ar são colocadas, respetivamente, na base e no topo de cada piso;
- Multi-piso (*Multi storey*): neste caso não existem quaisquer partições horizontais ou verticais, a circulação do ar é feita através de grandes aberturas localizadas na base e no topo do edifício. Esta configuração é aplicada quando não há possibilidade de colocar aberturas ao longo do envidraçado. Neste caso, é imperativo que as salas adjacentes à cavidade sejam ventiladas mecanicamente;

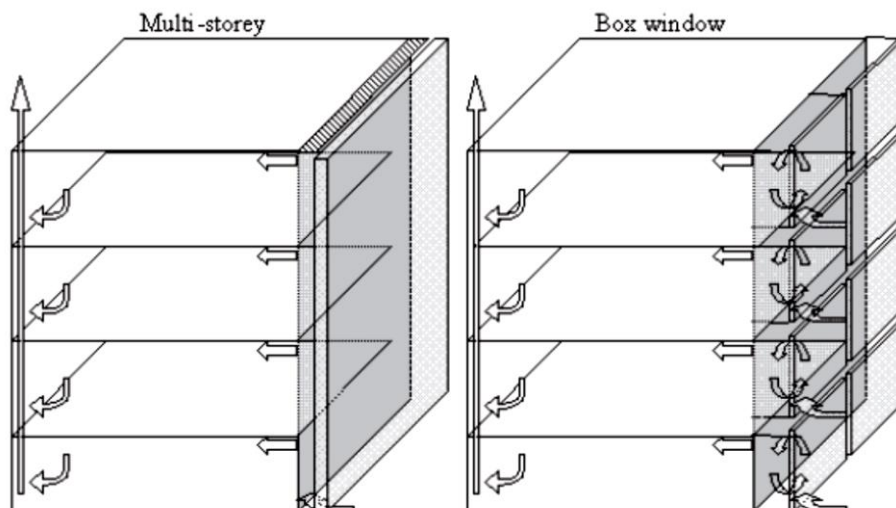


Figura 2 - Fachada do tipo modular e multi-piso (Poirazis 2006).

- Coluna de extração (*shaft box*): a fachada é dividida horizontalmente convergindo o ar para uma chaminé central por onde é extraído. Esta classificação difere da anterior pela forma como o ar é extraído – em vez de ser diretamente pelas aberturas superiores é através da “chaminé”;

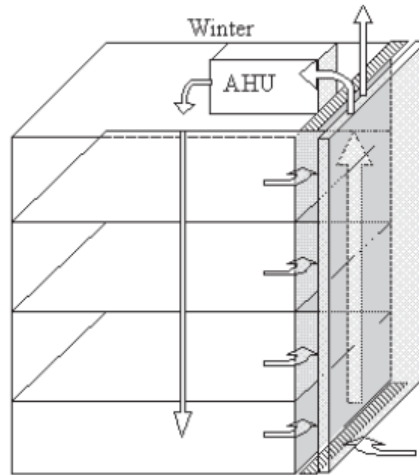


Figura 3 - Fachada tipo chaminé (Pirazi 2006).

- Corredor (*Corridor facade*): é semelhante à fachada de coluna de extração, com divisões horizontais, mas sem a chaminé central, funcionando de piso em piso, formando uma cavidade mais larga. Esta configuração é normalmente aplicada por segurança em caso de incêndio ou por questões associadas à acústica;

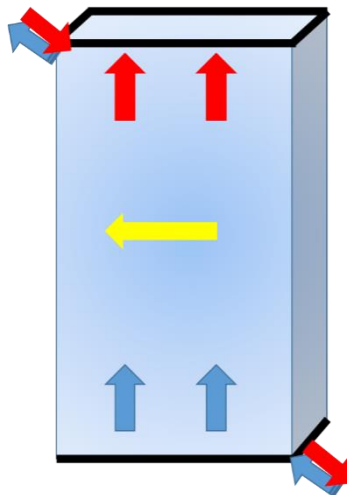


Figura 4 - Fachada do tipo corredor.

- Tampão (*Buffer zone*): neste caso temos uma caixa-de-ar entre os vidros exterior e interior, sem qualquer comunicação com o interior ou com o exterior. Esta camada funciona como barreira térmica. Existe a possibilidade de se colocar uma pequena abertura para o exterior apenas para efetuar um balanço de pressões.

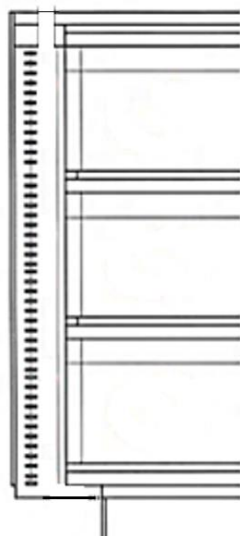


Figura 5 - Fachada tipo tampão (adaptada de Boake 2014).

## 2.2 Vantagens e Desvantagens

Este tipo de construção apresenta, como qualquer outro, vantagens e desvantagens. Face ao recurso a tecnologias mais dispendiosas como painéis eletrónicos apresenta baixo custo de construção. No entanto, quando comparado com um edifício convencional é considerada mais dispendiosa. Quando considerados os custos totais – construção e utilização – a fachada de dupla pele evita os custos de ventilação mecânica a longo prazo.

De acordo com a dimensão da caixa-de-ar, esta pode servir como isolamento acústico para o ruído exterior. A tipologia da fachada de dupla pele pode ainda garantir o isolamento acústico entre salas (Poirazis 2006). No entanto, quanto maior a dimensão da cavidade, menor é a área útil do edifício e, quando mal projetada, pode acrescer problemas de ruído interno (entre divisões ou pisos).

O isolamento térmico é garantido, sendo que, durante o Verão e o Inverno a fachada assume diferentes funções. Durante o Verão são atingidas temperaturas mais altas, por isso é útil que o interior seja arrefecido durante a noite através de ventilação natural, poupando assim energia. A ventilação natural noturna é mais vantajosa com a dupla pele pois esta providencia segurança contra roubos e isolamento relativamente às condições exteriores, face a uma construção convencional. Os equipamentos de sombreamento utilizados diariamente ficam também protegidos da chuva/neve e vento.

É frequentemente referida a poupança de energia devida à fachada de dupla pele. Ao reduzir a entrada de luz solar no edifício, o conforto térmico dos ocupantes aumenta e, consequentemente decrescem as necessidades de arrefecimento/aquecimento mecânico. Embora ainda não existam estudos concretos, é referido várias vezes que os custos de construção da fachada de dupla pele são compensados pela redução do custo de utilização do edifício durante o seu tempo de vida (Poirazis 2006).

O efeito de pressão do vento pode ser reduzido através da dupla pele quando bem adaptada à construção e ambiente envolvente. Esta redução pode ser mais eficiente se as janelas se encontrarem fechadas para que a pressão na cavidade sofra menos flutuações.

Por vezes o envidraçado utilizado nas construções modernas é reduzido devido às complicações associadas à radiação incidente e acumulação de calor. Estas complicações prejudicam fortemente a o desempenho energético do edifício e o conforto térmico interior. A dupla pele permite que, quando bem projetada, o ambiente interior não seja afetado pelas condições exteriores. Isto é, se pensarmos no caso da radiação excessiva, a dupla pele, permite que o calor armazenado fique na caixa-de-ar, na quantidade conveniente controlada pela ventilação, em vez de passar diretamente para o interior. Desta forma, funciona como uma espécie de “filtro” às condições exteriores.

Por fim, este *design* pode ter variadas vantagens que, infelizmente, podem tornar-se desvantagens caso a estrutura seja mal concebida ou inadequada à envolvente. Os custos de manutenção são acrescidos face a uma construção comum.

### 3. Camada Limite Atmosférica

Enquanto que os sistemas meteorológicos de escala sinóptica – presentes em altitudes muito acima da superfície terrestre – os sistemas de meso ou microescala, de menor dimensão e altitude, são muito afetados pela interação com o solo.

“A camada limite atmosférica (CLA) é a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e que responde aos forçamentos da superfície com uma escala de tempo de cerca de uma hora ou menos.” (Silva 2012).

A CLA tem uma espessura variável que pode ir de algumas centenas de metros a vários quilómetros. Esta camada encontra-se entre a superfície da Terra e a atmosfera livre. É, por isso, influenciada pela presença da superfície da Terra tendo grande variabilidade diurna e elevada turbulência. A resposta da CLA à superfície é criada pelo efeito do atrito entre a superfície e o fluido, criando um perfil de velocidades vertical e crescente.

#### 3.1 Camada Limite Urbana

Considerando uma zona urbana, correspondente ao caso de estudo, forma-se a camada limite urbana, em tudo semelhante à camada limite acima descrita, quando influenciada pela presença do edificado.

A CLU subdivide-se em três partes de acordo com a distância ao solo. A primeira encontra-se junto ao solo – Camada de Cobertura Urbana – com uma espessura sensivelmente igual à altura média dos elementos de rugosidade, isto é, dos edifícios. Possui um campo de velocidades próprio que depende das condicionantes do local, chegando a depender do trânsito aí presente.

A segunda parte da CLU é dada pela Camada de Rugosidade, logo acima dos edifícios, controlada pela turbulência gerada pelos edifícios e com padrões de circulação muito irregulares.

Por último existe a Camada Inercial, zona onde predominam os efeitos de inércia, velocidades do vento elevadas e um comportamento semelhante ao de uma Camada Limite sobre uma superfície rugosa (devido aos edifícios).

De seguida serão descritos alguns conceitos importantes para os cálculos realizados mais à frente.

##### 3.1.1 Lei de Potência

Esta é uma das formas de descrever o perfil médio de velocidades de uma camada turbulenta, a partir de um valor de referência para a velocidade do vento:

$$U(z) = U_{ref} \times \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

Onde  $U_{ref}$  é a velocidade do vento num ponto de referência,  $z$  a cota do ponto onde se pretende estimar a velocidade do vento,  $z_{ref}$  a cota do local de medição do valor de referência e  $\alpha$  é um coeficiente que depende de vários fatores como a rugosidade do local, cota, hora do dia, velocidade do vento, temperatura entre outros. Existem diversas aproximações para a sua determinação.

##### 3.1.2 Perfil da Camada Limite Urbana

Como já foi referido o edifício em questão situa-se numa zona urbana, pelo que é necessário recorrer às expressões que representem o comportamento de uma camada limite urbana.

A expressão que permite estimar a velocidade do vento num determinado local urbano é dada por:



$$U_u = \frac{u_{*u}}{k} \times \ln\left(\frac{z-d}{z_{0u}}\right) \quad (2)$$

Onde  $k$  é a constante de Von Kármán ( $k=0,4$ ) e  $z$  corresponde à cota do ponto em estudo,  $d$  representa o deslocamento do plano de referência e  $z_{0u}$  representa a altura equivalente da rugosidade na zona urbana.

A velocidade de atrito,  $u_{*u}$ , é dada por:

$$u_{*u} = u_{*0} \times \left(1 + \frac{\ln\left(\frac{z_{0u}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{\delta_u}{z_{0u}}\right)}\right) \quad (3)$$

Na qual, a velocidade de atrito no local de referência é:

$$u_{*0} = \frac{kU_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right)} \quad (4)$$

Sendo que a única variável ainda não descrita é a altura da rugosidade do local de referência,  $z_{0ref}$ .

O parâmetro  $z_{0u}$  é dado por:

$$z_{0u} = \frac{1}{2} \times \overline{h_r} \times \lambda_f \quad (5)$$

Em que  $\overline{h_r}$  corresponde à altura média da CLU,  $\lambda_f$  é a razão entre a área média das fachadas e a área total em planta.

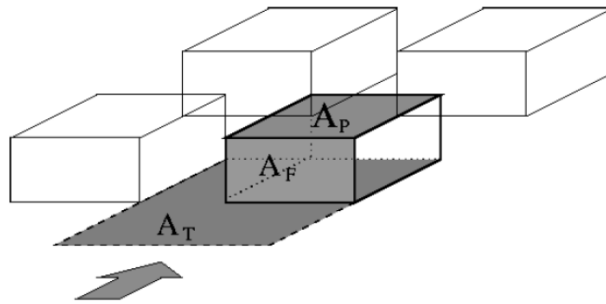


Figura 6 - Razão entre a área média das fachadas e a área total em planta (Silva 2012).

$$\lambda_f = \frac{A_F}{A_T} \quad (6)$$

$$\lambda_p = \frac{A_P}{A_T} \quad (7)$$

Através destas duas razões pode classificar-se o tipo de escoamento entre edifícios, em função da incidência do vento e das características da malha urbana.

O tipo de escoamento pode ser classificado de três formas: isolado, de interferência ou rasante, de acordo com os quocientes acima descritos.

Tabela 1 - Tipo de escoamento numa camada limite urbana (Silva 2012).

Isolado	$\lambda_p \leq 0,1$ $\lambda_f \leq 0,13$ $\frac{\Delta x}{h_r} > 15$
Interferência	$0,1 < \lambda_p < 0,4$ $0,13 < \lambda_f < 0,25$ $4 < \frac{\Delta x}{h_r} < 15$
Rasante	$\lambda_p > 0,4$ $\lambda_f > 0,25$ $\frac{\Delta x}{h_r} < 4$

A espessura da CLU,  $\delta_u$ , pode ser estimada da seguinte forma:

$$\delta_u = z_{0u} \times \left[ 0,65 - 0,03 \times \ln \left( \frac{z_{0u}}{z_0} \right) \right] \times \left( \frac{x}{z_{0u}} \right)^{0,8} \quad (8)$$

Em que  $x$  representa distância entre o ponto de referência e o local em estudo.

Temos ainda o deslocamento  $d$ , em relação ao plano de referência, que pode ser definido como a cota a partir da qual se fazem sentir os efeitos do atrito. Para zonas na subcamada de inércia, porque o quociente entre a cota e a rugosidade do terreno não é elevado, considera-se:

$$d = 0,7 \times \overline{h_r} \quad (9)$$

Quando não se verifica esta relação o deslocamento,  $d$ , é dado por:

$$d = \overline{h_r} \times \left[ 1 - \frac{1 - e^{(-\sqrt{15 \times \lambda_f})}}{\sqrt{15 \times \lambda_f}} \right] \quad (10)$$

## 4. Ventilação Natural

A par da forma como circula o ar dentro da camada limite atmosférica, estabelecem-se padrões de circulação do ar entre o exterior e o interior dos edifícios. Os processos que estabelecem, de uma forma controlada, fluxos de ar entre o exterior e o interior, que se chama Ventilação.

No passado as necessidades de ventilação eram muito básicas sendo cumpridas através de aberturas não controladas. Com a necessidade de renovar o ar e remover poluentes e odores criam-se novas metodologias de ventilação natural mais sofisticadas e adequadas a cada local. Através destas metodologias reduz-se a velocidade do ar bem como as grandes perdas térmicas.

Todos os edifícios libertam calor que se acumula devido à utilização do espaço – quer pelas pessoas quer por máquinas, equipamentos e iluminação. A fim de evitar problemas térmicos é necessário remover com eficiência o calor em excesso. A ventilação natural vem resolver estes problemas enquanto permite poupança no consumo de energia, menor investimento, funcionando sem ruído. Esta tecnologia é ainda facilmente adaptada a qualquer edifício não exigindo grande manutenção. No entanto, a sua maior fragilidade é a dependência das condições climáticas que, porventura, podem fazer com que a ventilação natural não seja suficiente para suprimir as necessidades de renovação do ar interior. Daí que sejam necessários estudos aquando da implementação de um sistema deste tipo.

### 4.1 Processos indutores

Nos edifícios é o diferencial de pressões entre dois lados de uma abertura que promove um fluxo de ar. Estes processos podem ser térmicos ou eólicos.

## 4.2 Componente Térmica

Devido ao efeito de impulsão com origem na diferença de temperaturas entre o interior e o exterior. A diferença de temperaturas entre um espaço interior e um exterior ou entre dois espaços interiores corresponde a uma diferença de densidades que gera diferentes gradientes de pressão hidrostática. Os diferentes gradientes de pressão conduzem a um desequilíbrio de pressões que promove fluxos de ar. É de admitir que a posição vertical das aberturas tenha influência adicional nos fluxos de ar, principalmente no que diz respeito à força de impulsão. O diferencial de pressões é dado por:

$$\Delta P^T = 0,021 H_{12} \Delta T \quad (11)$$

Sendo que  $H_{12}$  representa a diferença em altura de duas aberturas. Esta equação é posteriormente desenvolvida de forma a adaptar às diferentes aberturas e características do espaço em estudo.

### 4.2.1 Componente eólica

A componente eólica deve-se à conversão da energia cinética do vento em pressão estática sobre a envolvente do edifício. O efeito do vento sobre um edifício depende da sua própria forma, da sua envolvente e da incidência do vento. Todos estes parâmetros resultam em diferentes pressões distribuídas sobre as envolventes que se traduzem em coeficientes de pressão.

A resultante das pressões é a força dinâmica motriz do escoamento,  $F_i$ , sendo o seu valor dado por:

$$F_i = P_i A_i = \frac{1}{2} \rho U_0^2 C_{p_i} A_i \quad (12)$$

Onde  $p_i$  é a pressão local;  $A_i$  é a área da abertura;  $\frac{1}{2} \rho U_0^2$  é a pressão dinâmica de referência, sendo  $\rho$  a massa volumica do ar e  $U_0$  a velocidade média do vento a uma altura de referência para a qual foram determinados os coeficientes de pressão  $C_{p_i}$  definidos por:

$$C_{p_i} = \frac{p_i - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (13)$$

Onde  $p_0$  é a pressão estática de referência (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985).

O coeficiente  $C_p$  é definido através da razão entre a pressão estática local, causada pela incidência do vento, deduzida da pressão estática ambiente, e a pressão dinâmica do escoamento não perturbado (Ferreira 2013).

O valor deste coeficiente é variável de acordo com as diferentes características do edifício e ambiente circundante. Podemos assumir, de um modo geral, que estes coeficientes vão ser positivos na fachada a barlavento, negativos na fachada a sotavento e variáveis nas fachadas laterais e cobertura. Existem várias metodologias para o cálculo dos  $c_p$ . O método mais rigoroso é o ensaio do edifício em túnel de vento o que se torna muitas vezes dispendioso e apenas justificável caso se verifiquem diferenças muito significativas no comportamento da distribuição de pressão na envolvente face às que se apresentam normalmente. Daí que, neste estudo os coeficientes de pressão tenham sido determinados com base na literatura – Orme, Malcom, Artin Liddament, and Andrew Wilson. 1998. “AIVC Technical Note 34.” Technical Note, Air Infiltration and Ventilation centre.

### 4.2.1 Perdas de carga

Quando se admite que as velocidades do ar no interior de cada espaço interno são pequenas em relação às que se verificam através das aberturas podemos considerar que existe uma difusão rápida. Este processo é responsável pela dissipação de energia ao longo do percurso do ar que é contabilizada pelas perdas de carga. A variação causada na pressão é dada por:

$$\Delta p = p_{ext} - p_{int} = \xi \frac{1}{2} \rho U |U| \quad (14)$$

Onde  $\xi$  é o coeficiente dito de perda de carga característico da abertura que depende tanto da sua forma como da sua localização bem como do regime de escoamento através da abertura.  $U$  é a velocidade do ar na abertura.

## 5. Programa de cálculo – Ventil.for

Tendo por base o estudo da ventilação natural numa fachada de dupla pele, é utilizado um programa de cálculo automático de ventilação natural – Ventil (Saraiva, Delgado and Borges Novembro de 1985).

O modelo numérico foi criado com o intuito de ultrapassar dificuldades na estimativa dos parâmetros associados à circulação natural do ar. A ação do vento juntamente com a geração ou remoção de calor dos espaços interiores dificulta a tarefa de determinar o número de renovações em cada espaço e as condições de pressão e temperatura. O controlo destes fatores pode determinar o grau de conforto dos utilizadores bem como a qualidade do ar.

O programa de cálculo automático baseia-se na resolução de um algoritmo que tem por base um modelo simplificado para a ventilação natural criado a partir da geometria das edificações e das características térmicas das paredes, coberturas e funcionamento das aberturas. Este devolve as taxas de ventilação, as temperaturas e pressões (coeficientes) no interior de cada um dos seus espaços, resultantes da interação da edificação com a envolvente (Saraiva, Delgado and Borges Novembro de 1985).

### 5.1 O algoritmo

Considere-se uma edificação qualquer com  $i$  espaços internos, intercomunicantes entre si e com o exterior por meio de aberturas. Admitindo-se que as variações de densidade apenas de fazem sentir em termos de impulsão – Hipótese de Boussinesq:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} \approx \frac{\Delta T}{T} \quad (15)$$

Esta é a hipótese de Boussinesq aplicada à ventilação natural na medida em que a variação causada na massa volúmica do ar deriva maioritariamente do diferencial de temperatura.

Admitindo igualmente que a temperatura é uniforme em cada espaço e que a variação de pressão é hidrostática, sendo a mesma em qualquer plano horizontal desses espaços, as equações fundamentais são as seguintes:

#### 5.1.1 Equação da continuidade

Considere-se um edifício com  $i$  espaços internos, intercomunicantes entre si e com o exterior por meio de  $k_i$  aberturas. Admitindo a hipótese de Boussinesq, que a temperatura é uniforme em cada espaço interno e que a variação da pressão é hidrostática, as equações fundamentais são:

- 1) Para cada espaço interno

$$\sum_{k_i} U_{k_i} A_{k_i} = 0 \quad (16)$$

- 2) Para a edificação

$$\sum_i \sum_{k_i} U_{k_i} A_{k_i} = 0 \quad (17)$$

Onde  $U_{ki}$  e  $A_{ki}$  são respetivamente a velocidade média e a área de abertura. O índice  $k$  representa a abertura e  $i$  o espaço interno.

### 5.1.2 Equação da quantidade de movimento

Para descrever a quantidade de movimento de fluido é utilizada a equação de Bernoulli descrita abaixo.

Esta é uma derivação da equação de Euler com base em pressupostos sobre as propriedades do fluido e do escoamento. Pressupõe-se que os efeitos de viscosidade são desprezáveis, o escoamento é estacionário, o fluido é incompressível e a análise é feita ao longo de uma linha de corrente.

1) Para as aberturas internas

$$(\Delta\rho_i H_{ki} - \Delta\rho'_i H'_{ki})g + (\Delta p'_i - \Delta p_i) - \xi_{ki} \frac{1}{2} \rho_0 U_{ki} |U_{ki}| = 0 \quad (18)$$

Onde  $\Delta\rho_i$  e  $\Delta p_i$  representam, respetivamente, as diferenças de massa volúmica e pressão entre o interior e o exterior.  $H_{ki}$  é a altura média da abertura, tomando como referência a cota da abertura mais baixa no espaço em análise. O índice superior indica as grandezas correspondentes no espaço contíguo ao espaço em estudo ( $i$ ), com o qual a comunicação é estabelecida através da abertura  $k_i$ .

2) Para as aberturas exteriores

$$(\Delta\rho_i H_{ki})g + \left(\frac{1}{2} \rho_0 U_0^2 C_{p_{ki}} - \Delta p_i\right) - \xi_{ki} \frac{1}{2} \rho_0 U_{ki} |U_{ki}| = 0 \quad (19)$$

Onde  $\Delta\rho_i$  toma o valor zero e  $\Delta p_i$  representa a pressão causada pela incidência do vento.

### 5.1.3 Equação da Energia

Para cada espaço:

$$\dot{Q}_i + \sum_{k_i} \rho_0 C_{p_{ar}} U_{ki} A_{ki} \Delta T_i + \sum_{l_i} h_{li} A_{li} (\Delta T_i - \Delta T'_i) = 0 \quad (20)$$

Para a edificação:

$$\sum_i \dot{Q}_i + \sum_i \sum_{k_i} \rho_0 C_{p_{ar}} U_{ki} A_{ki} \Delta T + \sum_i \sum_{l_i} h_{li} A_{li} (\Delta T_i - \Delta T'_i) = 0 \quad (21)$$

Sendo  $\dot{Q}_i$  o calor gerado no espaço,  $C_{p_{ar}}$  o calor específico do ar,  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre o espaço interior  $i$  ou espaço contíguo  $i'$  e o exterior.  $A_{li}$  é a área da parede não adiabática  $l_i$  e  $h_{li}$  o seu respetivo coeficiente global de transferência de calor.

Com base nas hipóteses atrás apresentadas pode fechar-se o sistema de equações considerando que o ar se comporta com um gás perfeito:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} + \frac{\Delta T_i}{T_0} = 0 \quad (22)$$

A equação de estado  $p = \rho RT$  reduz-se, assim, à equação (22) acima apresentada.

As equações algébricas não lineares formam um sistema de equações fechado que pode ser solucionado com o conhecimento das condições ambientais (temperatura, velocidade e direção do vento), distribuição das pressões (coeficientes de pressão), características geométricas e térmicas da edificação.

## 5.2 Breve descrição do programa

A ventilação natural de um edifício com NA(I) aberturas em cada um dos seus NESP internos (I = 1, 2, ..., NESP) fica caracterizado pelo conhecimento das velocidades do ar em cada abertura e das variações de pressão, massa volúmica e temperatura em cada espaço. O total de incógnitas resume-se a:

$$N = \sum_{I=1}^{NESP} NA(I) + 3 \times NESP \quad (23)$$

Isto é, cada espaço é descrito pelo número de aberturas de comunicação com o exterior ou entre espaços contíguos mais três variáveis correspondentes, respetivamente, a pressão, massa volúmica e temperatura do espaço em estudo. O Ventil resolve o sistema de equações através de um processo iterativo de triangulações ortogonais sendo necessário introduzir algumas variáveis:

- i. Estimativa inicial da solução para iniciar o processo (geralmente 1 ou -1 consoante o ar entre ou saia na abertura em causa);
- ii. A velocidade do vento, temperatura exterior e pressão atmosférica;
- iii. O calor específico do ar, a constante dos gases e a aceleração da gravidade.

Os parâmetros de saída são as renovações por hora no espaço I – REN(I); o número de Froude – FR(I); um parâmetro de potência adimensional que relaciona as duas forças que levam ao escoamento de ar na fachada – PSI(I); o coeficiente de pressão interior; e o DELT(I) que representa a variação de temperatura do espaço.

Note-se que o número de Froude é a razão entre a força inercial e gravitacional, utilizado para caracterizar o escoamento de um fluido quando encontra um obstáculo. O PSI é dado por:

$$PSI(I) = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 U_0^3}{\frac{Q(I)}{APL(I)}} \quad (24)$$

Após a introdução de todos os dados através do menu do programa é criado um ficheiro base onde são guardadas todas as variáveis introduzidas. Este ficheiro pode ser editado evitando a repetição de todo o processo inicial.

## 6. Caso de estudo: Edifício H – Office Park Expo

O edifício em estudo situa-se no Parque das Nações no Office Park Expo. Este é constituído por 10 edifícios de escritórios num total de 30 mil metros quadrados. O edifício destaca-se em termos da sustentabilidade e eficiência energética tendo sido considerado Melhor Empreendimento do Ano e o Melhor Edifício de Escritórios. Ambos os prémios foram atribuídos à Norfin que desenvolveu o projeto. A fachada totalmente envidraçada tem como objetivo diminuir as necessidades de energia para arrefecimento no interior sem comprometer o conforto dos utilizadores. A implementação deste sistema de fachada ficou a cargo da FACAL que, em parceria com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil tem vindo a aprofundar os estudos e o conhecimento sobre estes sistemas para um clima de Sul da Europa.

O edifício em causa apresenta uma fachada de dupla pele que se enquadra nas classificações descritas em 2.1: fachada de ventilação natural, do tipo corredor, com a altura de dois pisos e cortina de ar exterior.



Figura 7 - Edifício H – Office Park Expo (Facal n.d.).

O objetivo do presente estudo é, então, a análise de uma fachada de dupla pele com recurso ao modelo numérico anteriormente apresentado. Os intervalos temporais da campanha, referida anteriormente, apresentam-se na seguinte tabela:

Tabela 2 - Intervalos temporais de campanha (Facal n.d.)

Campanha	Início	Fim
1	27 de Agosto de 2009	7 de Outubro de 2009
2	2 de Dezembro de 2009	10 de Fevereiro de 2010
3	26 de Abril de 2010	8 de Junho de 2010
4	9 de Julho de 2010	31 de Agosto de 2010

A partir das campanhas efetuadas escolheram-se períodos com as condições mais favoráveis ao estudo que se pretende, nomeadamente, condições de céu limpo e nublado e um dia representativo de cada estação do ano.

A monitorização foi realizada, em conjunto, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST) com o intuito de expandir o conhecimento sobre esta categoria de fachadas. Analisaram-se a temperatura dos vidros, do sombreador e da caixa-de-ar; a radiação solar horizontal e vertical; e a velocidade do ar junto da grelha de exaustão da fachada. Como descrito anteriormente, a parcela em estudo é constituída por dois pisos correspondentes ao décimo quinto e décimo sexto andar do edifício H. Na figura seguinte pode observar-se a localização dos instrumentos de medida utilizados na monitorização:

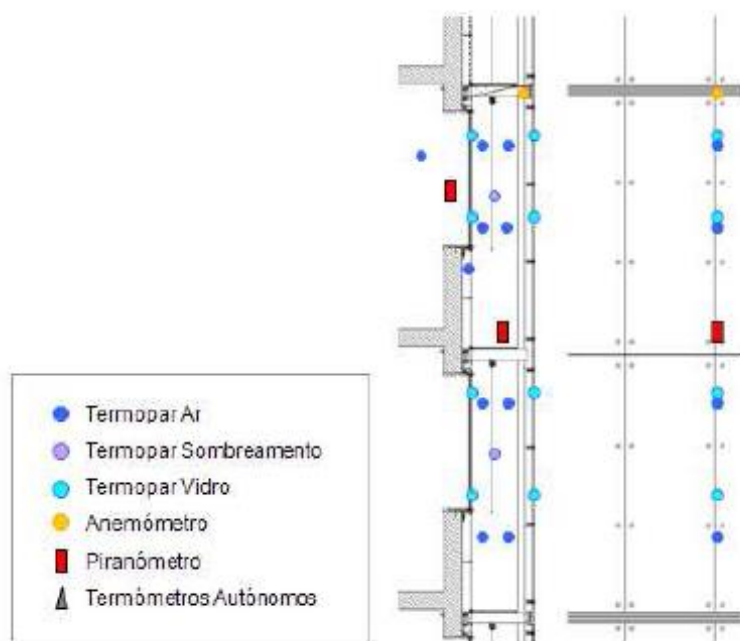


Figura 8 - Dispositivos de monitorização colocados na fachada. (Facal n.d.)

## 6.1 Constituição da fachada

Analisando a fachada do exterior para o interior, esta é constituída por: um vidro exterior, uma caixa-de-ar com o respetivo dispositivo de sombreamento e vidro duplo interior. Este último pano não é totalmente envidraçado, existindo uma parcela composta por um murete opaco com isolamento térmico.

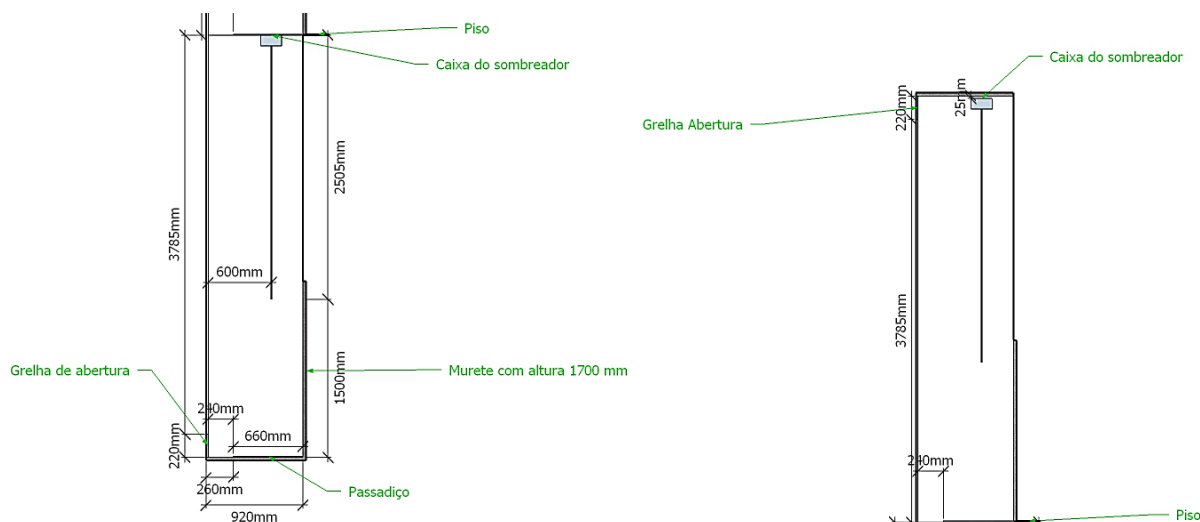


Figura 9 – Desenho ilustrativo do perfil da fachada do exterior para o interior (à esquerda o piso inferior; à direita o piso superior).

## 6.2 Vidro interior e exterior

A escolha do vidro tem como princípios base o conforto térmico dos utilizadores e a iluminação interior do espaço. Para isso deve escolher-se para camada exterior um vidro com capacidade de reflexão e igualmente resistente às ações do vento e outras condições climáticas. Para o interior é de interesse que o vidro tenha baixo coeficiente de transmissão térmica, reduzindo a passagem de calor da câmara-de-ar para o interior do edifício.



Foi então colocado um vidro duplo laminado com espessura total de 20 mm composto por: vidro temperado de controlo solar no exterior; e no interior um vidro simples termoendurecido. Ambos com 10 mm de espessura. O conjunto final apresenta um fator solar indicador de um bom desempenho, filtrando grande parte da radiação solar incidente.

**Tabela 3 - Detalhes técnicos do vidro exterior (FACAL n.d.).**

Parâmetro	Dados do fabricante	Dados de um estudo independente (TNO)
Fator solar	0.49	0.53
Transmissão luminosa	0.60	0.64
Reflexão para o exterior	0.10	0.09
Coefficiente de transmissão térmica (W/m <sup>2</sup> .K)	5.10	5.11

Após a barreira inicial, outra parte da radiação é bloqueada pelos dispositivos de sombreamento instalados. Após a ação dos mecanismos anteriormente descritos é indispensável impedir a transmissão térmica para o interior, garantindo um bom desempenho térmico final, através do vidro interior.

**Tabela 4 - Características do vidro interior duplo (FACAL n.d.).**

Parâmetro	Dados do fabricante	Dados de um estudo independente (TNO)
Fator solar	0.39	0.37
Transmissão luminosa	0.69	0.66
Reflexão para o exterior	0.10	0.10
Coefficiente de transmissão térmica (W/m <sup>2</sup> .K)	1.30	1.33

Apesar de existirem os valores tabelados (disponibilizados pelo fabricante Guardian) para as características dos envidraçados foi pedido a uma instituição independente para confirmar estes dados (TNO – Science and Industry). Apresentam-se de seguida as características óticas finais do envidraçado total:

**Tabela 5 - Características óticas do conjunto sem sombreamento (Silva et al. 2007).**

Transmissão Luminosa	Reflexão Luminosa	Fator Solar
42%	15%	19%

Considerando os dispositivos de sombreamento implementados e as suas características obtém-se um novo desempenho para o conjunto total – envidraçado e sombreamento:

**Tabela 6 - Características óticas do conjunto com sombreamento (Silva et al. 2007).**

Transmissão Luminosa	Reflexão Luminosa	Fator Solar
-	16%	5%

Os dispositivos de sombreamento encontram-se no interior da fachada, protegidos das condições exteriores, servindo para controlar a luminosidade e os ganhos térmicos. Neste caso o sombreador instalado é do tipo rolo de tela que permite regular a sombra.

### 6.3 Canal ventilado da fachada dupla

Determinadas as características dos elementos envidraçados, procederam-se a estudos – ainda na fase de projeto – para compreender qual seria a melhor configuração de acordo com o fluxo de ar por convecção natural no interior da fachada concluindo-se, que a melhor opção seria criar divisões horizontais, de dois em dois pisos, com entradas e saídas de ar na zona da divisão. Estas entradas e saídas

foram posicionadas alternadamente para impedir a passagem de ar quente nas divisórias. Para tal utilizam-se defletores de fluxo que afastam a carga térmica que ocorreria junto à face externa.

## 7. Dados do vento

Os dados relativos ao vento provêm das campanhas de monitorização anteriormente referidas. Estes dados dizem respeito às quatro estações do ano, tendo sido selecionados dias típicos de cada época sazonal com várias medições ao longo do dia.

O anemómetro de referência está localizado no Cabeço das Rolas, no Parque das Nações, a cerca de 1400m do edifício em estudo.

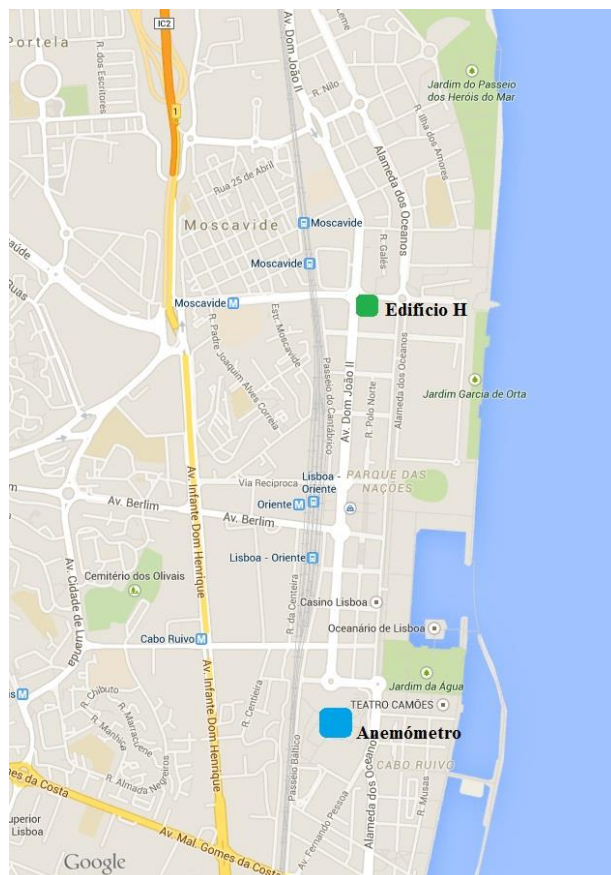


Figura 10 - Localização do anemómetro em relação ao edifício em estudo. (Google 2014)

Como os dados de campanha não foram medidos precisamente no edifício foi necessário realizar uma correção dos dados disponíveis. A velocidade do vento incidente no edifício é influenciada pelas diferentes rugosidades da envolvente e pela distância à torre anemométrica. Para compreender as correções efetuadas é necessário fazer uma pequena introdução à Camada Limite Atmosférica (CLA) e Urbana (CLU).

### 7.1 Correção da velocidade do vento

Como a rugosidade urbana da envolvente do edifício depende da direção do vento foi necessário adaptar os cálculos efetuados consoante a orientação do vento. Desta forma, aplicaram-se parâmetros de correção distintos para cada incidência do vento, uma vez que as características da camada limite atmosféricas descritas no Capítulo 3 (Camada Limite Atmosférica ) vão modificar-se de acordo com a distribuição da rugosidade urbana.

### 7.1.1 Características Locais

A zona da torre anemométrica pode ser classificada como um local pouco edificado ( $z_0 = 0,3$ ). No caso do edifício H, este encontra-se rodeado por construção significativa, pelo que é considerada uma zona urbana ( $z_0 = 1$ , (Silva, 2012)). Quanto ao tipo de escoamento, é considerado de interferência.

Considera-se que, para vento de Sul, a altura média da zona urbana,  $\overline{h_u} = 30m$ , e para vento de Norte,  $\overline{h_u} = 10m$ .

### 7.1.2 Direção Noroeste-Sudoeste e Nordeste-Sudeste

Uma vez que o escoamento vindo destes quadrantes se encontra totalmente desenvolvido, sobre a cidade (NO-SO) ou sobre o rio (NE-SE), recorre-se à lei de potência.

Para aplicar a lei de potência é necessário conhecer o valor do coeficiente  $\alpha$  que vai tomar diferentes valores para estes dois quadrantes.

No caso em que o vento circula maioritariamente sobre o rio (Nordeste-Sudeste) o valor de  $\alpha$  considerado é 0,20 – superfícies de água (Silva 2012). No caso do quadrante NO-SO o vento circula sobre uma zona urbana com  $\alpha$  igual a 0,28. (Silva 2012).

### 7.1.3 Direção Sul

Neste caso, o escoamento desenvolve-se sobre uma área de edificado com altura reduzida, pelo que é necessário recorrer às expressões referentes ao perfil da camada limite urbana, nomeadamente as da secção 3.1.2.

### 7.1.4 Direção Norte

Para esta incidência de vento, a torre anemométrica encontra-se a sotavento do edifício, pelo que os valores foram corrigidos através da relação entre as velocidades de atrito nos pontos A (torre anemométrica) e B (edifício H) à cota do anemómetro (Simiu 1996):

$$\frac{u_{*B}}{u_{*A}} = 1.15 \quad (25)$$

Após este passo a velocidade é corrigida para a altura pretendida através da seguinte expressão:

$$U_B = \frac{u_{*B}}{k} \times \ln \left( \frac{z_B - d_B}{z_{0B}} \right) \quad (26)$$

## 7.2 Conjunto dos resultados finais

Apresenta-se de seguida, para os dias selecionados, o conjunto dos resultados finais dos valores do vento corrigidos e da irradiância:

Tabela 7 - Velocidades do vento consideradas.

Caso de estudo	Estação do ano	Céu	Horas	Direção real do vento	Direção do vento em relação ao Norte [°]	Velocidade do vento (torre anemométrica) [m/s]	Velocidade do vento corrigida [m/s]	Irradiância na fachada [W/m <sup>2</sup> ]		
								NE	SE	SO
Caso 0	Primavera	Limpo	10:00	ESE	68	3,5	5,3	130,40	1713,77	489,65
Caso 1	Outono	Limpo	10:00	SO	346	2,9	4,4	106,16	661,78	360,10
Caso 2	Inverno	Nublado	21:00	SO	329	1,9	3,3	-115,96	0,00	7,50
Caso 3	Verão	Limpo	17:00	NO	190	3,8	7,5	637,23	302,54	131,87
Caso 4	Primavera	Nublado	9:30	NO	217	5,7	10,2	97,18	138,57	444,43

Os casos de estudo acima apresentados representam quatro dias de diferentes estações do ano e, igualmente, dias de vento forte e fraco, correspondendo a dias de baixa irradiância e alta, respetivamente. O primeiro caso de estudo (68°) foi um teste usado com o modelo simplificado. As direções do vento aqui apresentadas não correspondem às reais, mas às corrigidas de forma a utilizar a bibliografia disponível (Anexo 1: Coeficiente  $C_p$  bibliografia) tal como será exposto no parágrafo seguinte.

### 7.3 Correção do vento de acordo com a orientação da fachada em estudo

Os valores de velocidade do vento foram corrigidos para o local do edifício de acordo com os seus ângulos de incidência reais. No entanto, para uso da literatura de modo a obter os valores de coeficientes de pressão apresentados de seguida, é necessário calcular os ângulos de incidência do vento em relação a Norte, isto é, considerando que a normal à fachada do edifício representa a incidência 0° como no Anexo 2: Coeficiente  $c_p$  bibliografia.

O edifício H encontra-se orientado a SSE, correspondente a 140° em relação a Norte. Tal como no estudo anterior (Ferreira 2013) foram utilizadas as seguintes expressões para corrigir os ângulos de incidência do vento:

$$\varphi' = \theta_{fachada} - \varphi, \varphi \in [0^\circ; 140^\circ] \quad (27)$$

$$\varphi' = \theta_{fachada} + (360^\circ - \varphi), \varphi \in ]140^\circ; 360^\circ] \quad (28)$$

## 8. Coeficientes de pressão $c_p$

A forma de um edifício, a incidência do vento e a influência das características da sua vizinhança, resultam em pressões distribuídas sobre as envolventes. Estas pressões são dadas pelo coeficiente adimensional de pressão,  $c_p$ .

De uma forma genérica, as envolventes a barlavento têm coeficientes positivos e as envolventes a sotavento apresentam coeficientes negativos.

Para o ajuste dos coeficientes encontrados na bibliografia consideraram-se as orientações das fachadas em estudo e os seguintes dados:

Tabela 8 - Dados do edifício para consulta dos coeficientes de pressão na bibliografia.

Parâmetro	Valor
Altura do edifício [m]	74,5
Altura da base do piso 15 [m]	58,5
Altura da base do piso 16 [m]	66,3

Para a obtenção de valores de referência para  $c_p$  recorreu-se à literatura disponível (Orme, Liddament, and Wilson 1998), sendo posteriormente ajustados à fachada em estudo. (Anexo 1: Coeficiente  $c_p$  bibliografia).

Os valores de referência presentes na bibliografia encontram-se divididos por incidências do vento com um passo de 45°. Os dados utilizados para a velocidade do vento (dados reais da torre anemométrica) encontram-se no intervalo [0;360°], pelo que foi necessário estimar coeficientes de pressão para além dos intervalos de 45°. Estimaram-se estes valores através de uma interpolação linear com base nos valores do Anexo 1: Coeficiente  $c_p$ . É importante referir que foi também feito um ajuste entre as incidências do vento reais e as que são apresentadas na bibliografia de forma a obter corretamente os coeficientes de pressão como referido na secção 7.3.

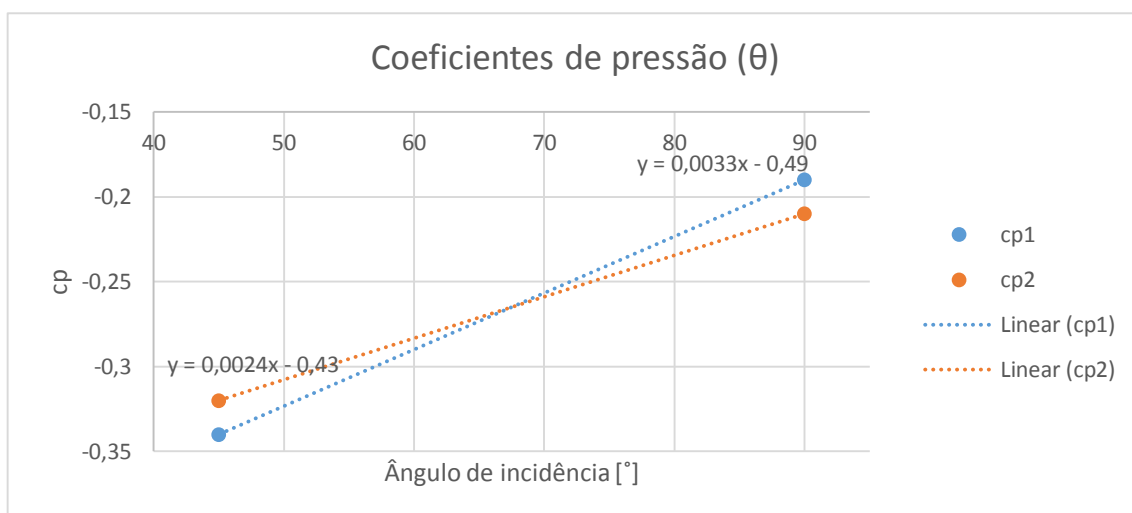


Figura 11 - Exemplo da estimativa dos coeficientes de pressão através da interpolação linear.

A interpolação destes coeficientes permite-nos obter valores dos coeficientes de pressão para os ângulos intermédios de incidência do vento.

Apesar destas interpolações serem muito úteis, por vezes não fazem sentido. Isto é, em casos em que há separação do escoamento forma-se uma zona de recirculação pelo que os valores dos coeficientes de pressão vão ser iguais aos de uma das incidências originais como exemplificado em 8.1.

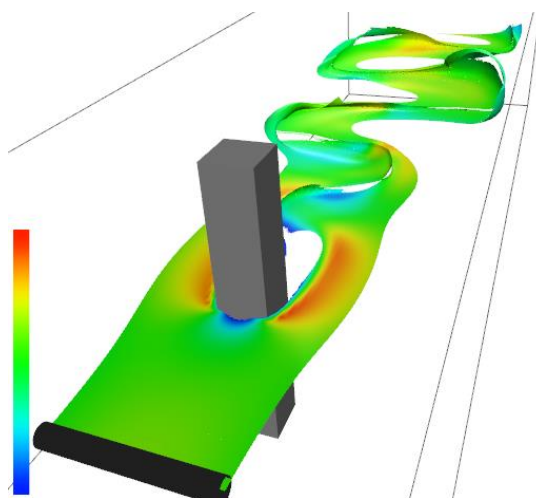


Figura 12 - Exemplo da incidência do vento num edifício onde ocorre bolha de recirculação do ar (McLoughlin, Laramie and Zhang 2010).

### 8.1 Situações Particulares

Em qualquer incidência do vento é necessário ter especial atenção à formação de zonas de separação do escoamento que vão influenciar a forma como o ar se comporta ao longo da fachada. Por exemplo, considerando uma incidência de 68°, vento vindo de Sudeste, incidirá mais sobre a fachada Sudoeste e é por aí que entra, sendo que vai circular ao longo da fachada principal, saindo pelo lado Nordeste. Isto é, os coeficientes de pressão para 68° vão aproximar-se mais dos valores atribuídos a 90° do que os de 45°. É de acordo com este raciocínio que devemos adatar os coeficientes de pressão retirados da bibliografia.

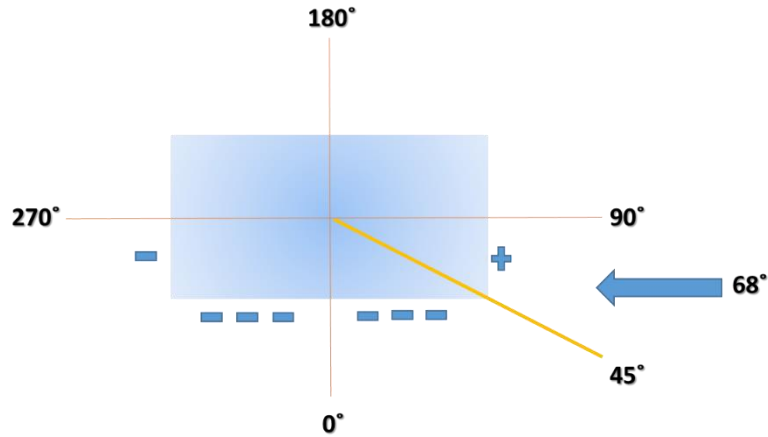


Figura 13 - Exemplo da incidência do vento 68°.

Segundo a literatura consultada, pode obter-se um valor de coeficiente de pressão para cada piso. No entanto, para determinadas incidências do vento, o valor do  $c_p$  iguala-se para ambos os pisos, o que cria um problema na introdução dos dados no Ventil. Tal deve-se ao facto de o modelo numérico só dispor de uma variável para a velocidade do vento, sendo que esta é diferenciada de piso para piso através do coeficiente de pressão. De modo a ultrapassar esta limitação foi necessário utilizar uma expressão que diferenciase o efeito do vento em todas as aberturas:

$$c_{p_{\text{piso16}}} = c_{p_{\text{piso15}}} \times \frac{U_{\text{piso16}}}{U_{\text{piso15}}} \quad (29)$$

Onde o coeficiente de pressão do piso superior é obtido com base no do piso 15.

## 9. Correção da irradiância

Os dados da irradiância são obtidos através das campanhas de medição anteriormente referidas. Porém, alguns dos dados eram inexistentes ou apenas parciais pelo que foi necessário estimar os valores em falta.

### 9.1 Valores da irradiância em falta

Para o caso em que não existiam quaisquer valores disponíveis, há dois métodos de cálculo. O primeiro através dos valores do PVGIS - Photovoltaic Geographical Information System. Para verificar se estes valores são coerentes, compararam-se os dados de campanha de um dia completo com os dados do PVGIS. Observou-se que estes eram fiáveis para algumas horas do dia mas apresentavam grande discrepância para outros intervalos de tempo. Daí que se tenha optado pela segunda metodologia de cálculo que a seguir se apresenta.

#### 9.1.1 Radiação incidente num plano inclinado

A radiação incidente num plano com uma determinada inclinação pode ser obtida através da seguinte relação:

$$I_{\text{superfície}} = K_{\downarrow} \times \cos \theta + F_{\text{sky}} \times D + F_{\text{solo}} \times \rho_{\text{solo}} \times G \quad (30)$$

Onde  $K_{\downarrow}$  é a radiação direta,  $\cos \theta$  representa a projecção dos raios solares sobre a normal da superfície,  $D$  é a radiação difusa,  $\rho_{\text{solo}}$  é o albedo do solo,  $G$  a radiação global e os coeficientes  $F_{\text{sky}}$  e  $F_{\text{solo}}$  são os fatores de forma do céu e do solo dados por:

$$F_{sky} = 1 + \frac{\cos \beta}{2} \quad (31)$$

$$F_{solo} = 1 - \frac{\cos \beta}{2} \quad (32)$$

Em que  $\beta$  é a inclinação da superfície que neste caso é dada por  $90^\circ$ .

### 9.1.2 Radiação direta e difusa

A radiação direta  $K_d$ , e a radiação difusa  $D$  podem calcular-se da seguinte forma:

$$K_d = k \sum_{n=1}^8 a_n \times \sin[(2n-1) \times h_s] \quad (33)$$

$$D = k \sum_{n=1}^9 b_n \times \sin[(2n-1) \times h_s] \quad (34)$$

Em que  $k$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são valores em função da visibilidade (Anexo 4: Radiação solar – coeficientes em função da visibilidade) e  $h_s$  é a altura solar.

### 9.1.3 Altura Solar

A altura solar representa o ângulo que um raio direto do sol faz com a horizontal num ponto da superfície terrestre.

$$\sin h_s = \sin \delta \times \sin \lambda + \cos \delta \times \cos \lambda \times \cos \omega \quad (35)$$

Sendo que  $\delta$  representa a declinação solar e  $\omega$  o ângulo horários descritos mais à frente. E por último,  $\lambda$ , que representa a latitude do local.

### 9.1.4 Declinação Solar

A declinação solar é o ângulo formado entre o plano do movimento aparente do sol e o plano equatorial.

$$\delta = 0,13 \times \pi \times \sin \left[ 2\pi \times \left( \frac{284 + J}{365} \right) \right] \quad (36)$$

Em que  $J$  representa o dia juliano.

### 9.1.5 Ângulo Horário

O ângulo horário traduz a hora solar em radianos, sendo zero ao meio dia solar (Sul), negativo para Este e positivo para Oeste.

$$\omega = \frac{\pi}{12} \times (AST - 12) \quad (37)$$

### 9.1.6 Hora Solar Aparente<sup>1</sup>

$$AST = hora\ local + \frac{meridiano\ local - longitude}{15} + ET - DST \quad (38)$$

A hora solar aparente é a diferença entre a hora real num dado local, sendo que às 12h o Sol está sobre o meridiano do observador. DST representa o ajuste para a hora de Verão.

### 9.1.7 Equação do Tempo

Esta equação tem em conta a excentricidade da Terra e a inclinação do seu eixo Norte-Sul. No fundo é a diferença entre o tempo solar verdadeiro e o tempo solar médio. Isto é, representa a diferença entre a posição real do Sol e a posição que ele ocuparia nesse mesmo momento se o eixo da Terra não fosse inclinado.

$$ET = \frac{9,87 \times \sin(4\pi \times J') - 7,53 \times \cos(2\pi \times J') - 1,5 \times \sin(2\pi \times J')}{60} \quad (39)$$

Na qual o valor do coeficiente  $J'$  é dado em função do dia juliano:

$$J' = \frac{J - 81}{364} \quad (40)$$

### 9.1.8 Projeção dos raios solares sobre a normal da superfície

O ângulo entre o Sol e a normal da superfície,  $\theta$ , é obtido através de:

$$\cos \theta = \cos h_s \times \cos \gamma \times \sin \beta + \sin h_s \times \cos \beta \quad (41)$$

Onde  $\beta$  representa a inclinação da superfície, neste caso  $90^\circ$ ,  $\gamma$  é o azimute da superfície em relação ao sol, dado por:

$$\gamma = |\varphi - a| \quad (42)$$

Em que  $\varphi$  é o azimute do sol e  $a$  é o azimute da superfície. Este azimute de superfície é, na prática, o azimute da fachada, ou seja, o ângulo existente entre o Sul e a normal da fachada em estudo.

### 9.1.9 Azimute do Sol

É o ângulo entre o ponto cardinal de referência estipulado e a posição do Sol:

$$\cos \varphi = \frac{\sin h_s \times \sin \lambda - \sin \delta}{\cos h_s \times \cos \lambda} \quad (43)$$

### 9.1.10 Validação dos resultados

Aquando do cálculo dos valores de radiação verificou-se que alguns não seriam válidos perante a situação apresentada. Para que estes resultados fossem viáveis foi necessário realizar alguns ajustes nos cálculos realizados. Desta forma, no cálculo do azimute do sol estabeleceu-se a condição de que se o

---

<sup>1</sup> Note-se que até aqui todas as equações apresentadas são dadas em radianos. No entanto, a partir da equação da secção 9.1.66 todas as expressões se encontram em graus. Presentes na bibliografia estão as expressões equivalentes em graus/radianos conforme necessário.



ângulo horário fosse inferior a zero, o cálculo a efetuar seria  $\cos(\varphi)$  de forma a obter um resultado positivo.

Por outro lado, existem horas do dia em que o Sol se encontra atrás da fachada e, por isso, o valor da radiação incidente seria negativo. No entanto, à fachada chega sempre radiação difusa e global refletida do solo e dos edifícios próximos, daí que se considerem apenas estas parcelas de forma a obter também valores positivos de radiação incidente.

A radiação incidente nos dias nublados é calculada a partir da radiação incidente calculada anteriormente. Tendo em consideração um dia de sol e um dia nublado, de uma fase em que os dados estejam completos, é possível calcular a redução de radiação solar incidente entre os dois períodos. A partir desta percentagem pode obter-se a radiação incidente de um dia nublado com base num dia de céu limpo.

## 9.2 Dados incompletos

Nos dados presentes para análise existem algumas lacunas principalmente no que diz respeito aos valores de radiação interna da fachada provenientes do piranómetro colocado atrás do dispositivo de sombreamento. Estas falhas de informação foram corrigidas através do uso dos registos que estão completos. Isto é, através dos dados completos é possível definir um padrão de sombreamento que pode ser aplicado aos dados em falta de acordo com a orientação da porção em estudo e com o intervalo horário de maior incidência solar.

Como o funcionamento dos sombreadores foi feito de forma automática durante a maior parte do tempo de recolha de dados optou-se por esta abordagem. Para além disso, quando o sistema de sombreamento passou a ser controlado manualmente pelo utilizador manteve-se sensivelmente o mesmo padrão de utilização.

Analizando dois dias distintos, um de céu limpo e outro de céu nublado, é possível observar o padrão referido anteriormente.

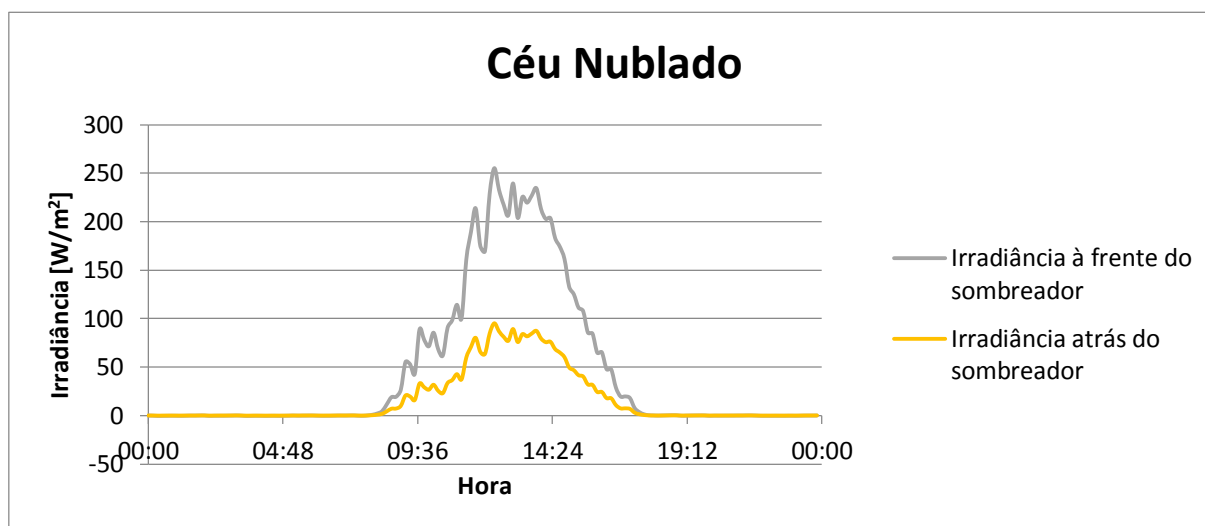


Figura 14 - Perfil de sombreamento da fachada SE num dia de céu nublado (Inverno 09-12-2009).

Num dia de céu nublado verifica-se que a irradiância é semelhante em ambos os lados do sombreador sendo que a diferença é amplitude que atinge uma diferença de sensivelmente 100 W/m².

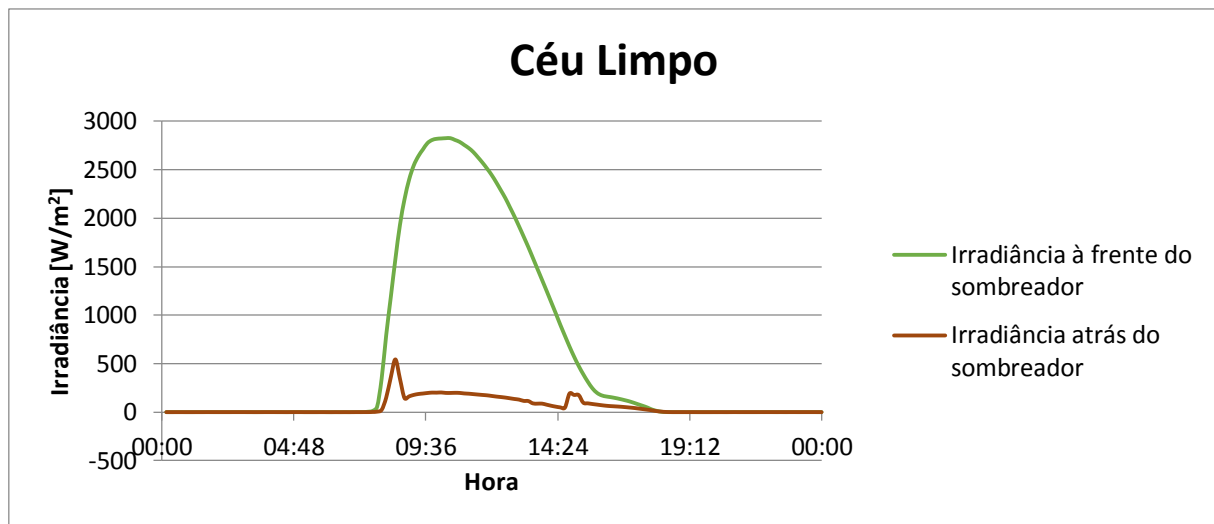


Figura 15 - Perfil de sombreamento da fachada SE num dia de céu limpo (Inverno 02-02-2010).

Num dia de céu limpo verifica-se que os dois perfis são bastante distintos, indicando que o sistema de sombreamento está em uso e os sombreadores se encontram descidos durante as horas de maior incidência de radiação solar. No início e no final do dia, quando se verifica que a incidência de luz solar é reduzida, os sombreadores são subidos e os dois perfis aproximam-se.

## 10. O modelo

### 10.1 Modelo simplificado

Primeiramente foram testados modelos criados em estudos anteriores e, inclusivamente, o modelo do manual do Ventil, tendo em vista a familiarização com o modelo de funcionamento do Ventil.

De seguida foi criado um modelo base com várias simplificações que, no futuro, podem tornar-se refinamentos que aproximarão cada vez mais o modelo à realidade do edifício e do ambiente que o rodeia. O modelo simplificado foi igualmente criado com o intuito de compreender, numa primeira observação, como se comporta a circulação de ar dentro da fachada. Desta forma será mais fácil interpretar os resultados obtidos com modelo final.

O modelo apresentado depende da secção de fachada em estudo, sendo que as fachadas orientadas a Sudoeste e Nordeste serão bastante semelhantes devido às suas dimensões. Estas são compostas por dois pisos e seis vidros de largura. A fachada principal é igualmente constituída pelos dois pisos sendo que se estende por trinta e seis vidros. De notar que todas as frentes contêm aberturas de passagem do ar, ligando-as entre si, e garantindo que o programa de cálculo assume a passagem de por convecção ao longo de toda a fachada.

Alguns dos elementos interiores da fachada foram também simplificados, considerando apenas a influência das caixas do sombreador e do passadiço inferior e intermédio. Assumindo que os sombreadores estavam subidos podemos partir do pressuposto que o calor armazenado é igual para ambas as secções à frente e atrás do sombreador pelo que existirá apenas um compartimento nessa zona e, consequentemente, menos aberturas.

Neste modelo foram colocadas divisões em altura – separadores fictícios com uma perda de carga residual – que permitem estruturar a fachada. Foram colocados no limite inferior do sombreador de modo a evitar grandes alterações na geometria interna da fachada de dupla pele.

Na fachada real existe um espaçamento entre a caixa do sombreador e o piso adjacente. No modelo aqui presente este espaço só se encontra representado no último compartimento, uma vez que no sombreador inferior, este espaçamento se torna desprezável face à distância à grelha do passadiço. Ao longo de todo o comprimento existem também colunas de suporte dos vidros exteriores que, devido à sua reduzida dimensão e aos espaçamentos entre elas, não foram consideradas. O murete e o vidro duplo interior foram considerados adiabáticos, não ocorrendo trocas de calor entre a cavidade e o interior do edifício.

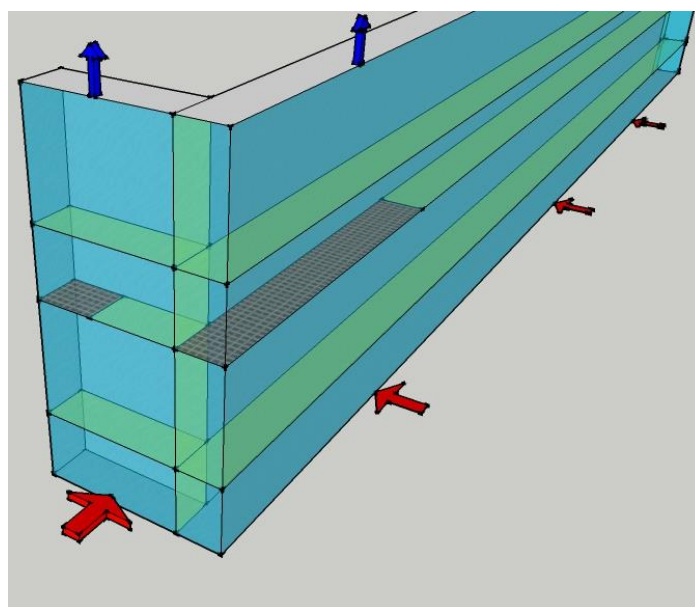


Figura 16 - Representação da fachada NE.

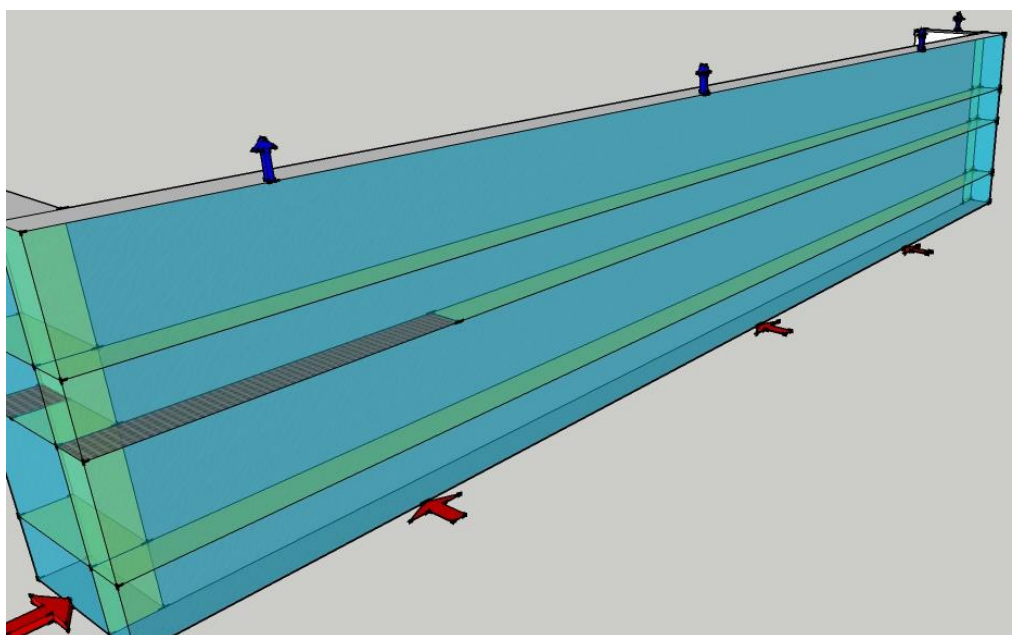


Figura 17 - Representação da fachada SE.

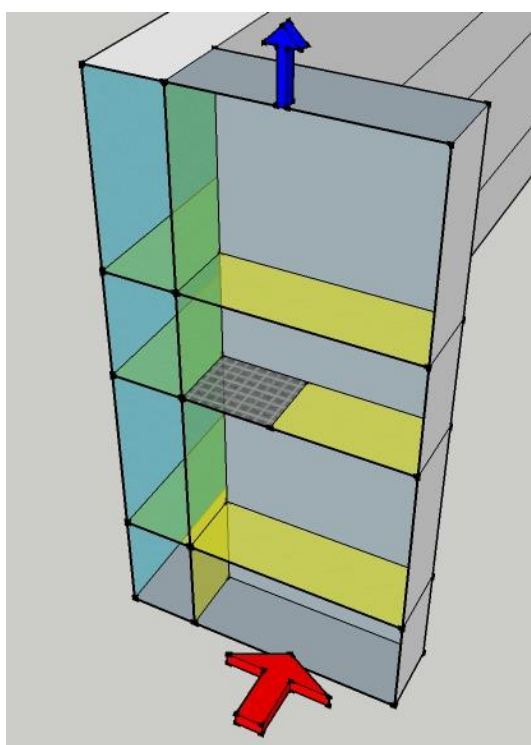


Figura 18 - Representação da fachada SO.

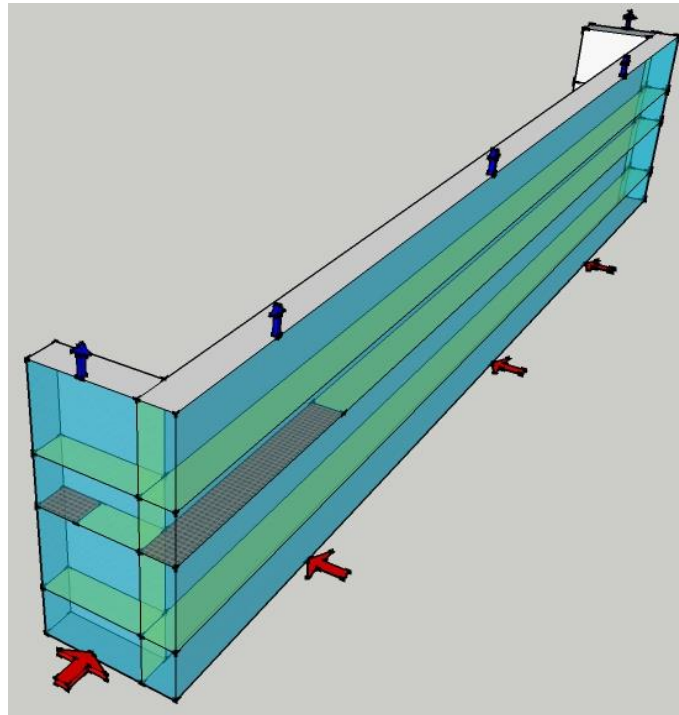


Figura 19 - Representação da totalidade do edifício vista sendo que à esquerda está a fachada orientada a NE.

Através dos desenhos esquemáticos acima apresentados pode observar-se representado pelas setas azuis e vermelhas as entradas e saídas de ar através das grelhas de abertura. A amarelo encontram-se representadas as aberturas de passagem do ar no interior da fachada, tanto da base para o topo como entre as três frentes da fachada. Na imagem representativa da fachada SO observa-se mais facilmente as ligações entre as fachadas representadas a amarelo. Por último identificam-se também as aberturas de ligação do elemento fechado que se encontra ao lado do passadiço. Este elemento fechado é representado pelo xadrez acinzentado. As divisórias horizontais aqui apresentadas são fictícias com exceção da divisória central que representa a divisão entre os pisos. Nesta está incluído o passadiço e o elemento fechado referido anteriormente.

Representa-se, de seguida, os elementos interiores de interesse, as respetivas dimensões e a identificação dos espaços e aberturas através de um corte da secção da fachada de dupla pele.

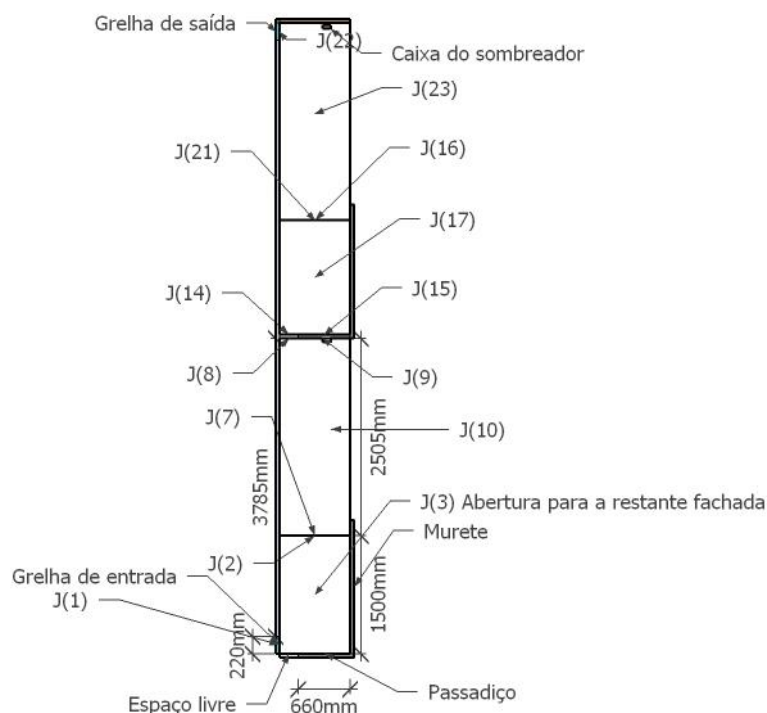


Figura 20 - Esquema do modelo simplificado para as fachadas SO/NE do exterior para o interior (dimensões não proporcionais).

A fachada principal é em tudo semelhante à da figura 20, no entanto, tem sempre duas aberturas centrais de passagem do ar em cada compartimento fazendo a ligação com Sudoeste e Nordeste bem como três grelhas de entrada de ar na base e três de saída no topo. Estas três aberturas garantem a viabilidade dos resultados ao apresentarem diferentes valores de coeficientes de pressão descrevendo o modo como o ar circula.

### 10.1.1 Dados Utilizados

O caso de estudo para o modelo simplificado baseia-se numa incidência de vento com  $68^\circ$ , sendo as condições exteriores as que constam da tabela 7. Tendo em consideração o modelo criado obtiveram-se os dados utilizados para a simulação. Para além destes dados são igualmente considerados os dados descritos anteriormente como os dados do vento ou os coeficientes de pressão.

Tabela 9 - Dados dos espaços utilizados na simulação.

Espaço	Número de aberturas	Número de paredes não adiabáticas	Calor Gerado [W]	Volume [m <sup>3</sup> ]	Área do Piso [m <sup>2</sup> ]	Altura Característica
1	3	1	2915,13	10,94	7,29	1,39
2	4	1	4868,27	18,26	7,29	2,49
3	4	1	2915,13	10,94	7,29	1,49
4	3	1	4868,27	18,26	7,29	2,40
5	6	1	21438,67	65,61	43,74	1,39
6	5	1	35802,58	109,57	43,74	2,49
7	5	1	21438,67	65,61	43,74	1,49
8	6	1	35802,58	109,57	43,74	2,40
9	3	1	776,34	10,94	7,29	1,39
10	4	1	1296,48	18,26	7,29	7,29
11	4	1	776,34	10,94	7,29	7,29
12	3	1	1296,48	18,26	7,29	7,29

O calor gerado aqui apresentado foi calculado com base nos valores de irradiância anteriormente referidos. Estes são valores provenientes da campanha de monitorização ou calculados segundo as equações (28)-(41) quando estão em falta. Nos espaços entre o vidro exterior e o sombreador é calculado da seguinte forma:

$$Q = RV_{\text{exterior}} \times \text{Área}_{\text{vidro}} \times g \quad (44)$$

Sendo que  $g$  (de valor 0,49) representa o fator solar do vidro.

No caso dos espaços entre o sombreador e o vidro interior o calor armazenado é calculado:

$$Q = RV_{\text{interior}} \times \text{Área}_{\text{vidro}} \quad (45)$$

Na aplicação da equação (45) em que não há dados disponíveis de RVI recorre-se à percentagem proveniente do padrão de sombreamento apresentado em 9.2 - Dados incompletos.

Tabela 10 - Dados dos elementos da fachada.

Elemento	Coefficiente de perda de carga, $z_L$
Grelhas de admissão/exaustão	6
Caixa do sombreador	0,26
Passadiço	0,58
Espaço Livre	3,91
Paredes fictícias Horizontais	0,1
Paredes fictícias Verticais	0,3

Os valores dos coeficientes de perda de carga foram baseados na literatura disponível para sistemas hidráulicos e condutas de ventilação [(Munson, Young, and Okiishi 2002); (CIBSE 2007); (Ferreira 2013)]

Tabela 11 - Dados dos fatores externos constantes (Saraiva, Delgado, and Borges Novembro de 1985).

Parâmetro	Valor
Velocidade do vento [m/s]	5,24
Temperatura Exterior [K]	288
Pressão Atmosférica [Pa]	1,016E5
Constante dos gases perfeitos, $R$ [J/kg.K]	288
Aceleração da gravidade, $g$ [m/s <sup>2</sup> ]	9,8
Calor específico do ar [J/kg.K]	1009

Tabela 12 - Tabela síntese dos parâmetros utilizados.

Espaço	Índice J	Primeira estimativa da solução	$c_p$	ICPCO	$z_L$	Área da abertura	$H_{\text{característica}}$	IHCO
1	1	0,5	-0,19	0	6	1,78	0	0
	2	-1	100	11	0,10	7,29	1,39	7
	3	1	100	33	0,10	0,68	0	31
	4	0	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	0	0
2	7	1	100	4	0,10	7,29	0	2
	8	-1	100	18	0,08	1,94	2,49	14
	9	-1	100	18	0,58	5,35	2,49	15
	10	1	100	41	0,10	1,13	0	39
	11	0	0	0	0	0	0	0

	12	0	0	0	0	0	0	0
	13	0	0	0	0	0	0	0
3	14	1	100	11	0,08	1,94	0	8
	15	1	100	11	0,58	5,35	0	9
	16	-1	100	24	0,10	7,29	1,49	21
	17	1	100	49	0,10	0,68	0	47
	18	0	0	0	0	0	0	0
	19	0	0	0	0	0	0	0
	20	0	0	0	0	0	0	0
4	21	1	100	18	0,10	7,29	0	16
	22	-0,5	-0,21	0	6	1,78	2,40	0
	23	1	100	58	0,10	0,68	0	56
	24	0	0	0	0	0	0	0
	25	0	0	0	0	0	0	0
	26	0	0	0	0	0	0	0
5	27	0,5	-0,37	0	6	3,56	0	0
	28	-2	-0,55	0	6	3,56	0	0
	29	-3	-0,77	0	6	3,56	0	0
	30	-1	100	41	0,10	43,74	1,40	36
	31	-1	100	4	0,10	0,68	0	3
	32	1	100	64	0,10	0,68	0	63
	33	0	0	0	0	0	0	0
	34	0	0	0	0	0	0	0
	35	0	0	0	0	0	0	0
6	36	1	100	33	0,10	43,74	0	30
	37	-1	100	49	0,08	11,66	2,49	44
	38	-1	100	49	0,58	32,08	2,49	45
	39	-1	100	11	0,10	1,13	0	10
	40	1	100	71	0,10	1,13	0	70
	41	0	0	0	0	0	0	0
	42	0	0	0	0	0	0	0
	43	0	0	0	0	0	0	0
7	44	1	100	41	0,08	11,66	0	37
	45	1	100	41	0,58	32,08	0	38
	46	-1	100	58	0,10	43,74	1,49	52
	47	-1	100	18	0,10	0,68	0	17
	48	1	100	78	0,10	0,68	0	77
	49	0	0	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	0	0	0
	51	0	0	0	0	0	0	0
8	52	1	100	49	0,10	43,74	0	46
	53	-5	-0,84	0	6	3,56	2,40	0
	54	-3	-0,58	0	6	3,56	2,40	0



	55	-2	-0,34	0	6	3,56	2,40	0
	56	-1	100	24	0,10	0,68	0	23
	57	1	100	84	0,10	0,68	0	83
	58	0	0	0	0	0	0	0
	59	0	0	0	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0	0	0
9	61	3	0,43	0	6	1,78	0	0
	62	-1	100	71	0,10	7,29	1,39	67
	63	-1	100	33	0,10	0,68	0	32
	64	0	0	0	0	0	0	0
	65	0	0	0	0	0	0	0
	66	0	0	0	0	0	0	0
10	67	1	100	64	0,10	7,29	0	62
	68	-1	100	78	0,08	1,94	2,49	74
	69	-1	100	78	0,58	5,35	2,49	75
	70	-1	100	41	0,10	1,13	0	40
	71	0	0	0	0	0	0	0
	72	0	0	0	0	0	0	0
	73	0	0	0	0	0	0	0
11	74	1	100	71	0,08	1,94	0	68
	75	1	100	71	0,58	5,35	0	69
	76	-1	100	84	0,10	7,29	1,49	81
	77	-1	100	49	0,10	0,68	0	48
	78	0	0	0	0	0	0	0
	79	0	0	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0	0	0
12	81	1	100	78	0,10	7,29	0	76
	82	3	0,42	0	6	1,78	2,40	0
	83	-1	100	58	0	0,68	0	57
	84	0	0	0	0	0	0	0
	85	0	0	0	0	0	0	0
	86	0	0	0		0	0	0

As variáveis ICPCO e IHCO referem-se a códigos internos do ventil. No primeiro atribui-se o índice J da pressão do compartimento ao qual determinada abertura está ligada. O IHCO refere-se ao índice J da abertura de intercomunicação entre o espaço em questão e o espaço contíguo com o qual comunica através da abertura J. Por exemplo, a abertura 2 comunica diretamente com a 7 e o índice de pressão do espaço contíguo correspondente é 11.

Ao olhar para a figura 16 podemos ver que a seta a vermelho indica a abertura 1. A abertura 2 corresponde à ligação à parte superior e a abertura 3 corresponde à ligação à outra frente de fachada. No caso do espaço 2, a abertura 7 liga ao espaço 1 – comunica com a abertura 2 –, a abertura 8 corresponde ao espaço fechado, a 9 ao passadiço (ambas ligando ao compartimento superior) e por fim a abertura 9 que comunica com a fachada SE. As aberturas e ligações dão-se sucessivamente desta forma.

Relativamente aos coeficientes de descarga, na abertura J(1) foram conjugados os efeitos da grelha de entrada e da interferência do espaço livre junto do passadiço. Nas aberturas J(2) e J(7) tanto o passadiço

como a caixa do sombreador foram considerados e, por fim, na abertura J(22) combinaram-se os efeitos da grelha e da caixa do sombreador.

Resta ainda definir as informações relativas às paredes não adiabáticas que, neste caso, vão ser apenas os vidros exteriores.

Tabela 13 - Dados referentes às paredes não adiabáticas.

Espaço	Número Parede	Área	IAPACO	U
1	1	12,15	0	5,1
2	2	12,15	0	5,1
3	3	12,15	0	5,1
4	4	12,15	0	5,1
5	5	72,9	0	5,1
6	6	72,9	0	5,1
7	7	72,9	0	5,1
8	8	72,9	0	5,1
9	9	12,15	0	5,1
10	10	12,15	0	5,1
11	11	12,15	0	5,1
12	12	12,15	0	5,1

O parâmetro IAPACO assemelha-se aos dois parâmetros internos do ventil, anteriormente descritos. Este é dado pelo índice da temperatura do espaço contíguo com o qual esta parede comunica. No caso de ser uma parede exterior toma o valor zero.

### 10.1.2 Resultados obtidos

Após executar o programa de cálculo com os dados dos pontos anteriores, obtiveram-se os seguintes resultados:

Tabela 14 - Resultados obtidos com o modelo simplificado.

Espaço	Índice J	Velocidade do ar [m/s]	Caudal [m³/s]	$\Delta p$ [Pa]	$\Delta p$ [kg/m³]	Coefficiente de pressão	$\Delta T$	Renovações por hora
1	1	-0,543	-3476,8	-3,5	-0,019	-0,207	4,6	340,6
	2	-0,009	-247,7					
	3	1,521	3724,5					
2	7	0,009	248,6	-3,3	-0,033	-0,192	7,9	300,9
	8	-0,370	-2584,3					
	9	-0,151	-2909,5					
	10	1,289	5245,3					
3	14	0,370	2584,3	-2,5	-0,037	-0,145	8,8	645,1
	15	0,151	2909,5					
	16	-0,269	-7054,3					
	17	0,367	1560,5					
4	21	0,269	7054,4	-1,9	-0,044	-0,114	10,6	386,3
	22	-1,018	-6524,9					
	23	-0,216	-529,5					
5	27	0,446	5716,4	-3,1	-0,010	-0,182	2,5	372,9
	28	0,621	7969,0					
	29	0,446	5716,4					
	30	-0,132	-20767,1					
	31	-1,521	-3697,1					
	32	2,083	5062,5					
6	36	0,132	20768,0	-3,0	-0,024	-0,174	5,7	260,0
	37	-0,261	-10954,9					
	38	-0,107	-12298,4					
	39	-1,289	-5231,3					
	40	1,902	7716,6					
7	44	0,261	10954,9	-2,4	-0,031	-0,141	7,4	395,3
	45	0,107	12298,9					

	46	-0.155	-24372.2					
	47	-0.637	-1560.5					
	48	1.094	2678.9					
8	52	0.155	24372.6	-1.9	-0.047	-0.114	11.2	227.3
	53	-0.658	-8448.8					
	54	-0.492	-6307.4					
	55	-0.658	-8448.7					
	56	0.216	529.5					
	57	-0.693	-1697.2					
9	61	1.642	10523.3	-2.3	-0.001	-0.136	0.2	962.3
	62	-0.207	-5423.2					
	63	-2.083	-5100.0					
10	67	0.207	5423.5	-2.3	-0.005	-0.136	1.3	423.7
	68	0.156	1088.3					
	69	0.064	1225.3					
	70	-1.902	-7737.1					
11	74	-0.156	-1088.3	-2.2	-0.009	-0.128	2.1	635.9
	75	-0.064	-1225.3					
	76	0.265	6953.7					
	77	-1.895	-4640.0					
12	81	-0.459	-12044.1	-2.0	-0.008	-0.120	1.9	659.6
	82	1.615	10346.9					
	83	0.693	1697.2					

Embora este seja considerado um modelo simplificado, é a base de estudo para um modelo mais complexo podendo ser utilizado no caso em que os sombreadores estão subidos. Para o caso em que há a utilização do sombreador descido será necessário um modelo mais complexo com alterações nos valores da radiação à frente e atrás do sombreador. Neste caso, de acordo com os horários de funcionamento automático do sombreador, na fachada SE o sombreador estaria descido pelo que este modelo não pode ser aplicado.

No entanto, analisando os resultados acima apresentados, podemos verificar que o ar se desloca da fachada Sudoeste para Nordeste devido à componente eólica e de baixo para cima devido à componente térmica. Este padrão de circulação do ar está relacionado com o facto de a fachada principal se encontrar numa zona de recirculação do ar devido à direção de incidência do vento no edifício. O mesmo se passa para a fachada NE.

A velocidade do ar vai ser superior nas aberturas para o exterior, uma vez que estas apresentam menor área do que as de passagem vertical. A passagem do ar entre as fachadas com diferentes orientações é feita com velocidade elevada também devido à área das aberturas.

A diferença de temperatura entre os espaços e o exterior aumenta verticalmente da base para o topo pois o ar é aquecido, diminuindo a massa volumica de ar (que se verifica no valor de  $\Delta\rho$ ) e provocando o efeito de impulsão que faz o ar subir.

A diferença de pressão entre os compartimentos e o exterior influencia diretamente os coeficientes de pressão através da equação (12). Quanto maior for o  $|\Delta p|$ , maior vai ser o valor absoluto coeficiente de pressão e, por isso, maior volume de ar vai entrar/sair por uma determinada abertura.

## 11. Simulação: modelos utilizados

De modo a simular todas as fachadas do edifício em simultâneo é necessário ter em consideração o padrão de sombreamento aplicado nas campanhas de Outono e Inverno. Apesar de, mais tarde, o sombreamento ser operado manualmente pelos utilizadores, o padrão manteve-se sensivelmente o mesmo, pelo que vamos considerar o que era aplicado automaticamente.

Tabela 15 - Horário do funcionamento automático do sombreador.

Período	NE	SE	SO
Manhã (07H - 15H)	Descido	Descido	Subido
Tarde (15H - 20H)	Subido	Subido	Descido

Através dos dados da Tabela 15 podem criar-se dois modelos para simulação: um para o período da manhã e outro para o período da tarde. Ambos os modelos têm por base o modelo simplificado (no caso em que os sombreadores estão subidos) com a diferenciação no caso em que os sombreadores estão descidos. Neste último caso criam-se dois compartimentos entre os dois sombreadores e o vidro interior de modo a aproximar a simulação da realidade do edifício. As variáveis assinaladas a azul representam as três incógnitas para cada espaço correspondendo às variações de  $\Delta p$ ,  $\Delta p$  e  $\Delta T$ , já referidas anteriormente.

### 11.1 Modelo do período da manhã

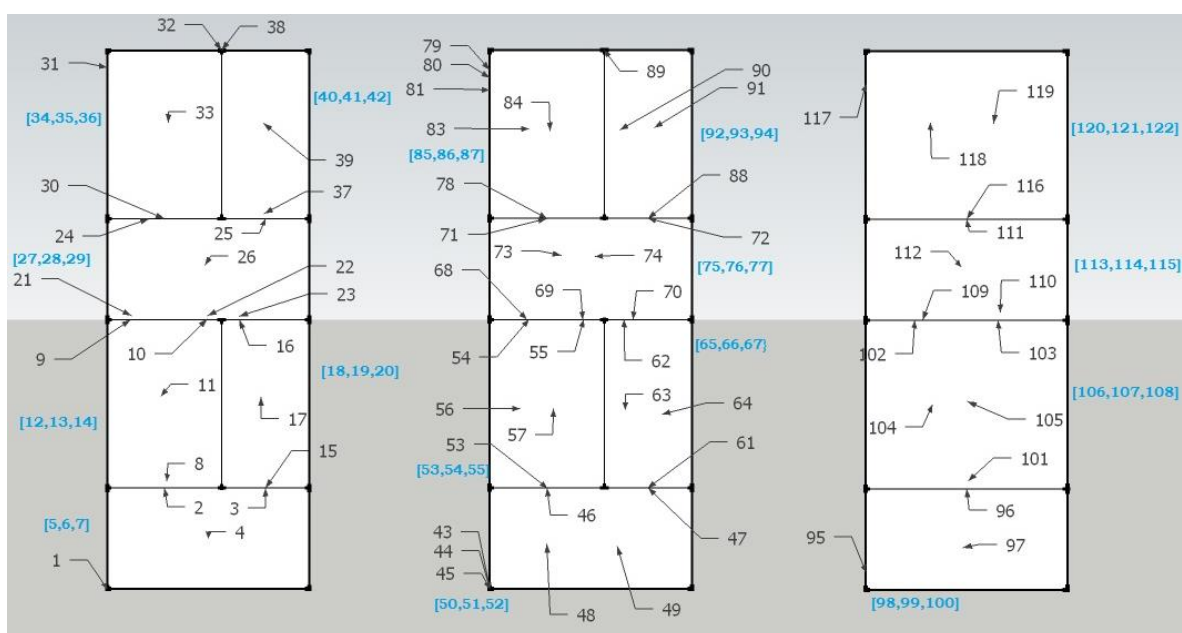


Figura 21 - Representação das três frentes em estudo correspondentes, respetivamente, às fachadas orientadas a NE, SE, SO.

### 11.2 Modelo do período da tarde

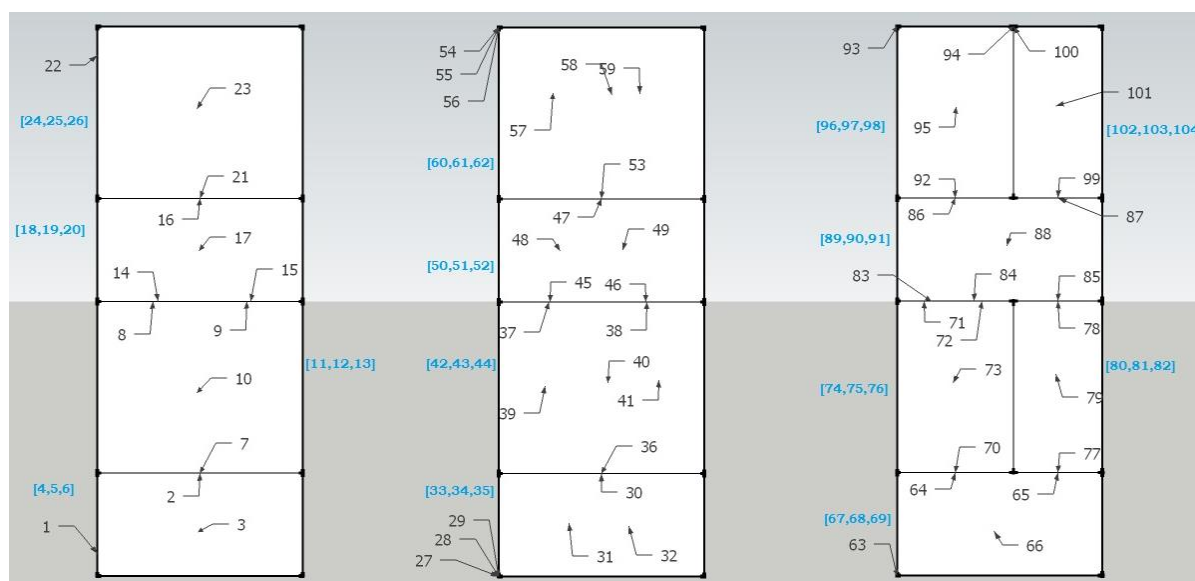


Figura 22 - Representação das três frentes em estudo correspondentes, respetivamente, às fachadas orientadas a NE, SE, SO.

## 12. Resultados

Nesta secção serão analisados os dois parâmetros fundamentais para o funcionamento de uma fachada de dupla pele: o caudal de ventilação e a distribuição de temperatura. Para isso é necessário relacionar estes parâmetros com os fatores externos que podem provocar variações no padrão de circulação do ar: a irradiância e o vento (em velocidade e direção).

Apesar de terem sido efetuadas mais simulações apenas se apresentam aqui os resultados referentes aos casos de estudos descritos anteriormente por demonstrarem os resultados mais significativos do estudo da fachada de dupla pele. Estes casos são representativos de diferentes condições do estado do tempo, do vento e da irradiância – parâmetros fundamentais.

Posteriormente é efetuada a validação dos resultados através da comparação dos parâmetros obtidos através do ventil e dos dados medidos na fachada.

### 12.1 Efeito do vento

O vento é um dos principais fatores para a circulação do ar numa fachada de dupla pele, em termos de velocidade e ângulo de incidência. O ângulo de incidência condiciona os coeficientes de pressão que dependem da forma do edifício e da sua envolvente. A acção do vento pode ser contabilizada através da diferença de pressões entre as aberturas:

$$\Delta p = \Delta c_p \times U_{base}^2 \times \frac{\rho}{2} \quad (46)$$

Onde a massa volúmica do ar,  $\rho$ , pode ser considerada constante e igual a 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

O caudal de ar segue sempre a direção do coeficiente de pressão menor. Daí que, segundo a equação 29, o caudal eólico seja sempre descendente, isto é, o diferencial de pressões é sempre menor do que zero. No entanto, na prática, a circulação do ar não se comporta de uma forma tão simplificada, pelo que, na figura seguinte, podemos observar caudais em ambos os sentidos.

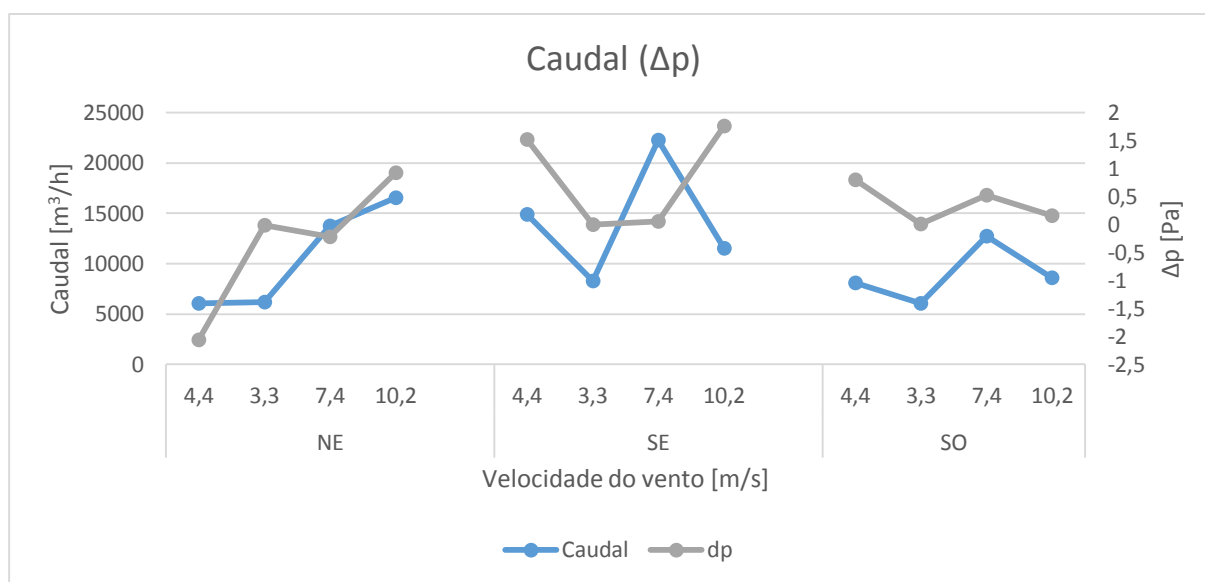


Figura 23 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada em função da velocidade do vento.

Da análise da Figura 23 é possível perceber que a relação entre a velocidade do vento e o caudal depende de fachada para fachada. No caso da fachada NE podemos observar que quanto maior é a velocidade do vento, maior será o  $\Delta p$  eólico e, por isso, maior será o caudal. Os perfis são bastante coincidentes indicando que o caudal total é maioritariamente composto pela parcela eólica.

No caso da fachada SE tanto o  $\Delta p$  como o caudal variam bastante demonstrando o efeito do vento e da irradiância. O peso da irradiância é maior na figura aqui apresentada, o que faz sentido uma vez que esta é a fachada com maior incidência de luz solar.

Para a fachada SO os perfis são bastante coincidentes existindo apenas uma variação de amplitude, isto é, o vento é altamente influente no caudal.

## 12.2 Parâmetro de potência adimensional PSI ( $\Psi$ )

Este é um dos parâmetros fornecidos nos resultados do Ventil e é dado por:

$$\Psi(I) = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 U_0^3}{\frac{Q(I)}{APL(I)}} \quad (47)$$

Onde  $Q(I)$  é a fonte de calor num dado espaço – neste caso é representado pela irradiância, e  $APL(I)$  representa a área em planta de um dado espaço. Pode facilmente perceber-se que, quanto maior for a velocidade do ar, maior será este parâmetro. Caso a irradiância seja mais representativa, o parâmetro será menor do que a unidade. De notar que, na ausência de irradiância, o Ventil considera este parâmetro nulo.

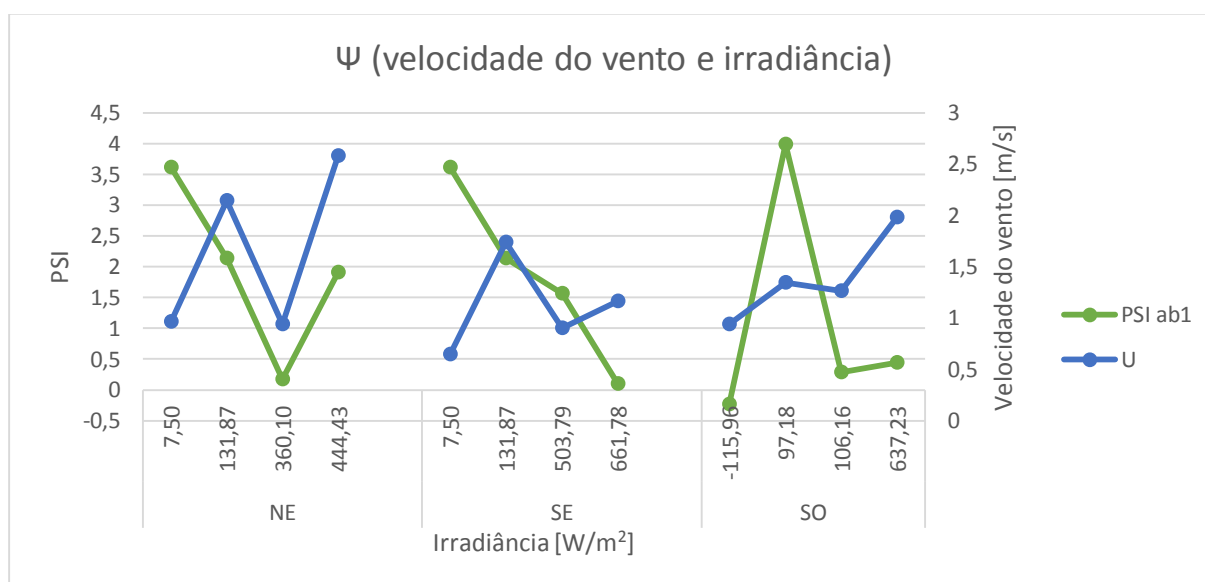


Figura 24 - Variação do PSI em função da velocidade do vento e da irradiância.

É perceptível pela figura 24 que, por norma, quanto menor é a irradiância, maior é o valor de PSI, indicando a superioridade do vento. Olhando para a fachada NE podemos verificar esta mesma situação com exceção do último ponto que representa um caso de vento de NO (muito forte e com grande influência). Para a fachada SE verifica-se que, quando a radiação é menor o valor do parâmetro  $\Psi$  é mais elevado e vai diminuindo à medida que aumenta a irradiância. Verifica-se que, inicialmente, quando há pouca radiação a velocidade do caudal é reduzida, o que demonstra que neste caso é a irradiância o fator fundamental. Por último, analisando a fachada SO podemos ver que para valores negativos de irradiância o valor de PSI se encontra abaixo da unidade. Este é um caso dados pelas 21:00 horas indicando que a inércia térmica dos componentes da fachada tem influência sobre o padrão de circulação do ar.

Através do gráfico acima apresentado pode ter-se uma noção dos efeitos do vento e da irradiância. No entanto, a figura também indica a variabilidade dos resultados devido à complexidade do modelo e elevado número de aberturas e compartimentos.

### 12.3 Efeito da irradiância

A irradiância tem sempre uma contribuição para o caudal de ar. Em dias de céu limpo e com baixas velocidades de vento, este efeito é mais notório e sobrepõe-se às outras forças. No entanto, em dias de céu nublado ou com outras condições o efeito da irradiância passa facilmente despercebido.

À semelhança do vento, a irradiância cria igualmente um gradiente de pressão ao longo da fachada dado por:

$$\Delta p = \Delta \rho \times g \times H \quad (48)$$

Onde  $\Delta \rho$ , responsável pelo gradiente de pressão, é a diferença de massa volúmica do ar entre a base e o topo da fachada,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $H$  representa a altura da fachada. Este parâmetro toma valores positivos quando a temperatura interior da fachada é superior à do exterior, promovendo um caudal ascendente.

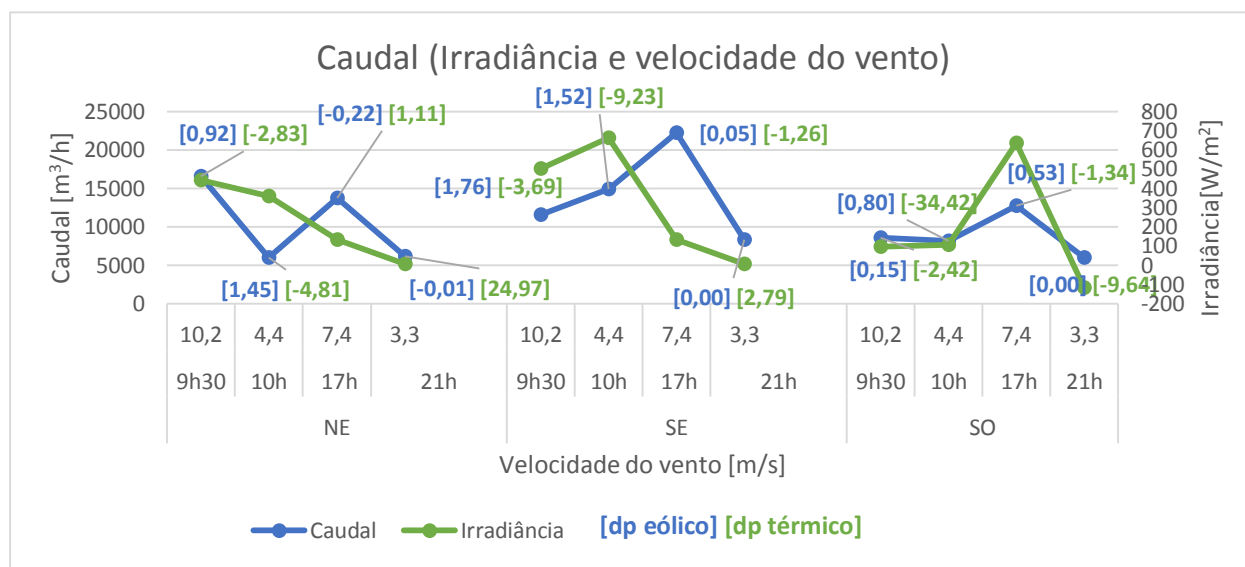


Figura 25 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada, em função da irradiância e da velocidade do vento. (Primavera, céu nublado, 9:30 horas; Outono, céu limpo, 10:00 horas; Verão, céu limpo, 17:00 horas; Inverno, céu nublado, 21:00 horas).

Pela figura anterior observa-se que, para a fachada NE ambas as curvas atingem o seu máximo pelas 9:30 horas, o que é coerente com os dados de irradiância. No entanto o dp eólico é superior ao térmico e essa situação inverte-se à medida que o tempo passa. O facto de dp térmico ser superior ao eólico pelas 21:00 horas deve-se ao facto de se libertar calor na fachada devido à inércia térmica. Para a fachada SE, o pico de irradiância é atingido perto das 10:00 horas e a curva do caudal também começa a aumentar neste período do dia. Ao longo da tarde a irradiância diminui mas o caudal tem o seu pico, indicando o efeito do vento. Na fachada SO o pico de irradiância é atingido pela tarde – sensivelmente às 17:00 horas – como seria de esperar. O perfil do caudal acompanha a linha da irradiância indicando que esta tem maior influência sobre a circulação do ar na fachada.

### 12.4 Temperatura interior da fachada de dupla pele

O Ventil devolve o parâmetro da diferença de temperatura, entre o interior e o exterior, para cada compartimento. A forma como varia a temperatura, em altura, em cada compartimento revela que tipo de caudal está presente no interior da fachada. Quando a temperatura aumenta em altura, o caudal é ascendente pois o calor é acumulado da base para o topo, fazendo variar a massa volúmica.

No caso de um caudal descendente o cenário é contrário. O aquecimento do ar acompanha o sentido do caudal e, por isso, o gradiente de temperatura é decrescente em altura. Esta situação ocorre porque o ar entra frio no topo e desce devido ao efeito do vento. Apresentam-se de seguida os resultados relativos a

cada caso de estudo. Os perfis atrás do sombreador são dados pelos compartimentos 3 e 6 quando o sombreador se encontra descido. Por vezes o padrão de circulação ascendente ou descendente pode não ser tão claro devido à influência do vento sobre a circulação do ar.

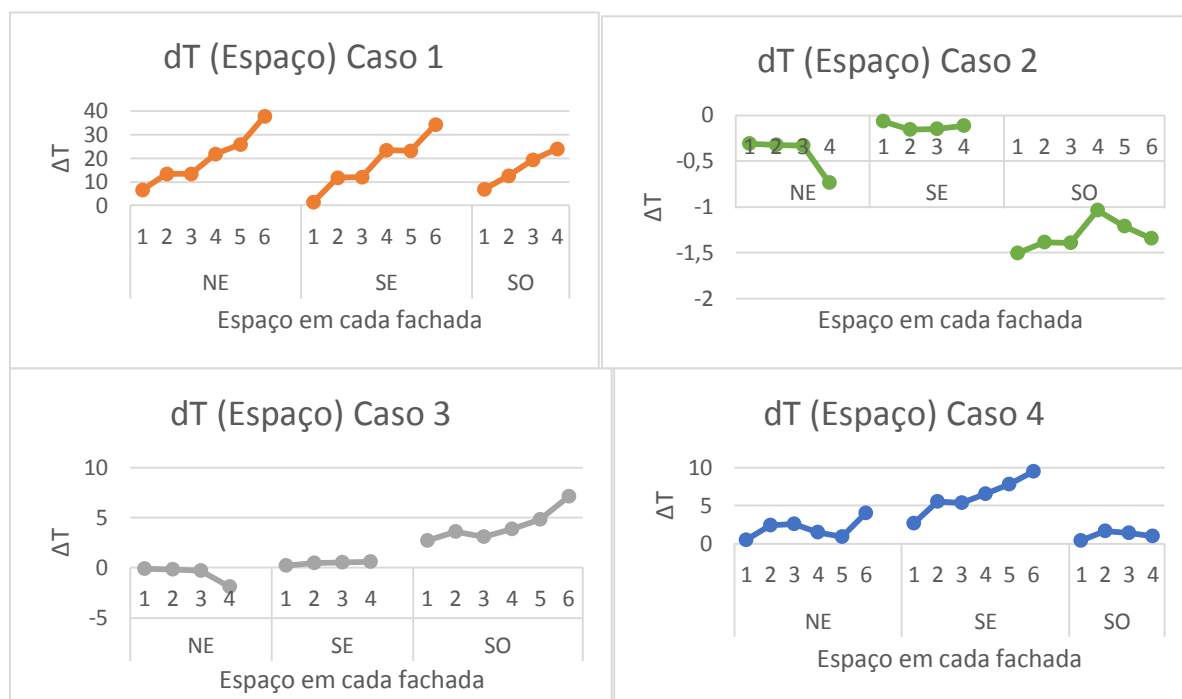


Figura 26 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior.

A partir dos diferentes gráficos é possível observar padrões de circulação do ar distintos. No primeiro caso temos caudais ascendentes em todas as fachadas o que coincide com os dados do caso de estudo (altos níveis de irradiância e velocidades do vento muito reduzidas).

No segundo caso – Inverno às 21:00 horas – não se verificam claramente padrões de circulação do ar devido à hora a que é dado o caso de estudo. No entanto, é mais uma vez possível verificar a acumulação de calor na fachada durante o dia e a sua libertação no período da noite, através do dT da fachada SO. Devido à época do ano, a temperatura exterior também desce mais no período da noite, daí que a diferença de temperatura seja mais acentuada.

No terceiro caso – decorrente às 17:00 horas verifica-se um caudal ascendente na fachada SO onde a radiação incide mais a esta hora e também na fachada SE onde a radiação incidente ainda é significativa.

Por último, o caso 4 – às 09:30 horas com vento de NO – pode verificar-se que os perfis de temperatura são facilmente afetados pelo vento sendo que na fachada SO, onde não incide sol a esta hora, a temperatura exterior é inferior à interior. Na fachada SE o caudal é ainda ascendente demonstrando a vantagem desta fachada em relação às outras no que diz respeito à incidência de luz solar.

### 12.5 Influência do caudal

O caudal em circulação na fachada vai ter impacto sobre a diferença de temperatura entre o interior e o exterior, na medida em que, quanto maior é a quantidade de ar em circulação, menor é a diferença de temperatura. Tal deve-se ao fato de o ar permanecer menos tempo no interior da fachada e, por isso, os efeitos da sua exposição à radiação incidente não são tão significativos.



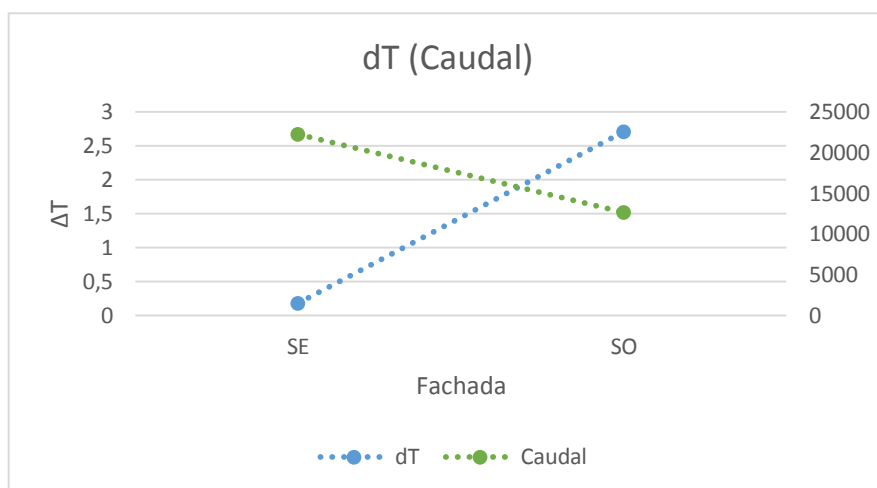


Figura 27 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior, em função do caudal (Caso 3).

Na figura 27 pode observar-se que, quando a curva do  $\Delta T$  toma valores mínimos, o caudal é muito grande e vice-versa. A linha apresenta-se tracejada por estes dois casos não estarem ligados, servem apenas de comparação entre o  $\Delta T$  e o caudal. O primeiro ponto dá-se na fachada SE e o segundo na SO, onde ocorre menor fluxo de ar e, por isso, a diferença de temperatura atingida é maior.

## 12.6 Caudal Horizontal

Para além do caudal que se verifica verticalmente em cada frente de fachada, é igualmente possível estabelecer relações entre as diferentes orientações. A forma como o fluxo de ar circula horizontalmente encontra-se fortemente influenciada pelos coeficientes de pressão ao longo do edifício como se pode verificar através das seguintes figuras esquemáticas, onde se representa a positivo a entrada de ar e a negativo a saída de ar, apenas pelas aberturas de ligação entre as fachadas:

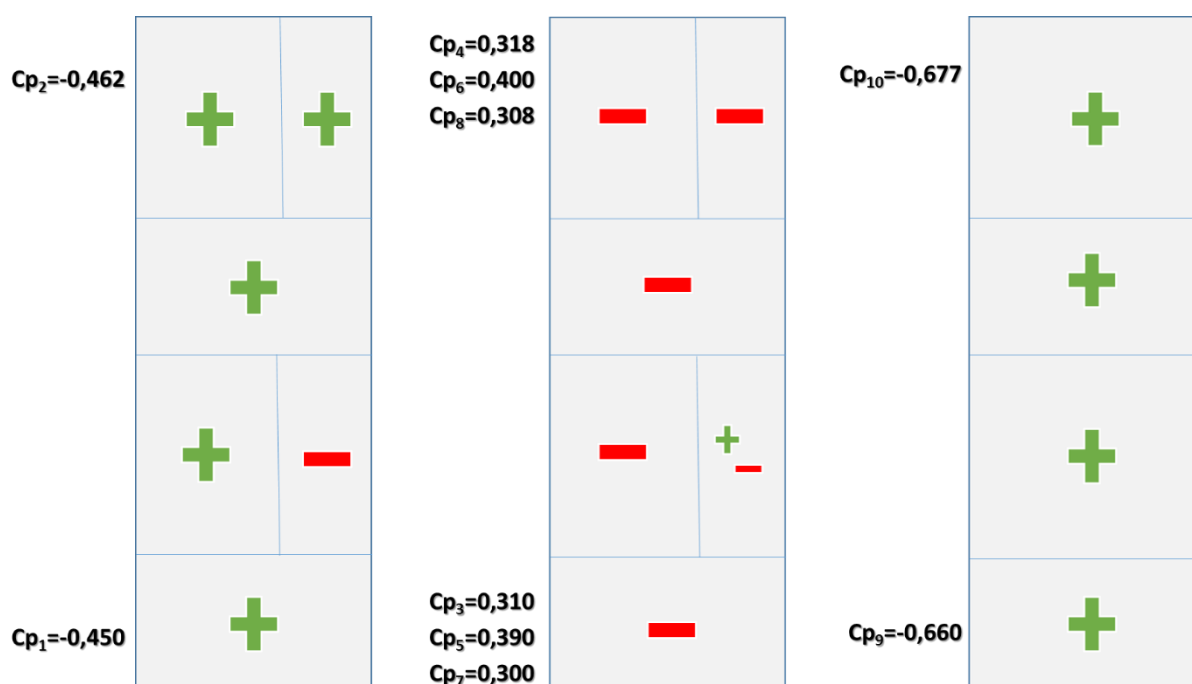


Figura 28 - Caudal horizontal do Caso 1 – incidência 346º (Os símbolos positivos representam a entrada de ar no compartimento assinalado e os sinais negativos representam a sua saída).

Neste caso pode verificar-se que, na fachada SE, onde os coeficientes de pressão são positivos, o ar entra pelas aberturas de ligação ao exterior – principalmente nas aberturas inferiores – e sai pelas aberturas laterais de ligação às outras fachadas. Como se pode observar, nos extremos os coeficientes de pressão assumem valores negativos pelo que o ar sai por estas aberturas, daí que tenha de ser repostado através da ligação às restantes frentes. Ocorre apenas uma exceção a este padrão de circulação do ar que pode observar-se dos dois compartimentos atrás do sombreador (3 e 9) das fachadas NE e SE respetivamente. É possível que tal se deva ao efeito da irradiância que provoca alterações no fluxo de ar.

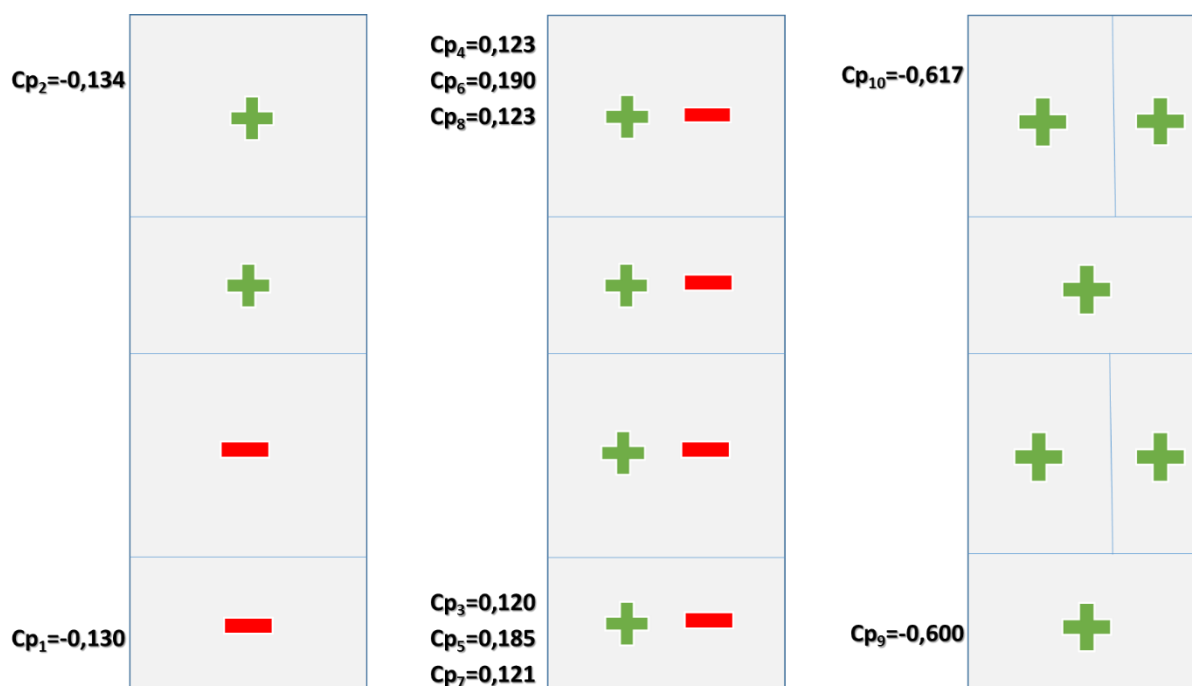


Figura 29 - Caudal horizontal do Caso 2 – incidência 329°.

Neste caso o padrão de circulação do ar não é tão bem definido verificando-se que na fachada NE existem dois compartimentos em que não é possível definir com certeza se o ar entra ou sai pelas aberturas laterais. No entanto, pelos resultados das aberturas de ligação com o exterior, prevê-se que o ar circule da fachada SE para a NE. Olhando para o edifício como um todo é possível ver que na fachada SO os coeficientes de pressão são mais negativos do que em NE pelo que a maior parte do fluxo de ar vai sair pela fachada SO. Desta forma, será obrigado a entrar lateralmente nesta mesma fachada. Na secção central (SE) os coeficientes de pressão assumem valores positivos pelo que a maior parte do ar entra na fachada através destas aberturas exteriores.

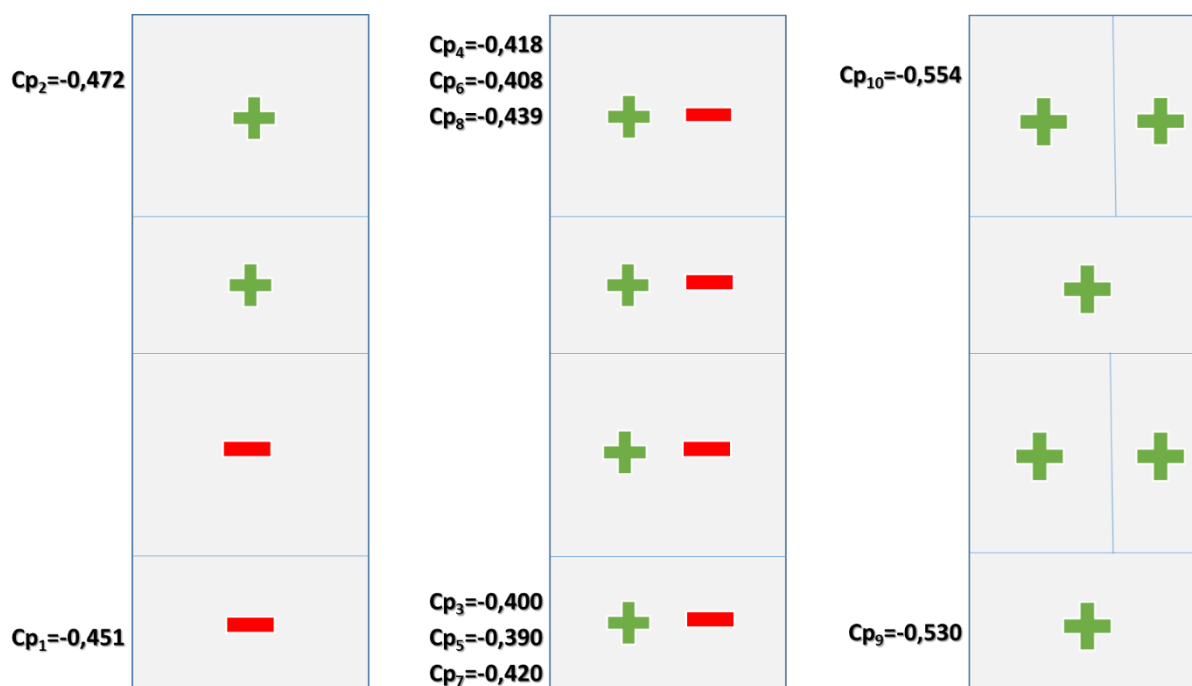


Figura 30 - Caudal horizontal do caso 3 - incidência 190°.

Relativamente ao caudal horizontal, o caso 3 apresenta-se bastante semelhante ao caso anterior, apesar de os coeficientes de pressão não coincidirem. O que acontece é que os coeficientes de pressão da secção central (SE) são opostos aos do caso 2, pelo que é aqui que parte o ar sai para o exterior. No entanto, em SO encontram-se os coeficientes de pressão de menor valor pelo que o fluxo de ar terá tendência a dirigir-se para esta fachada.

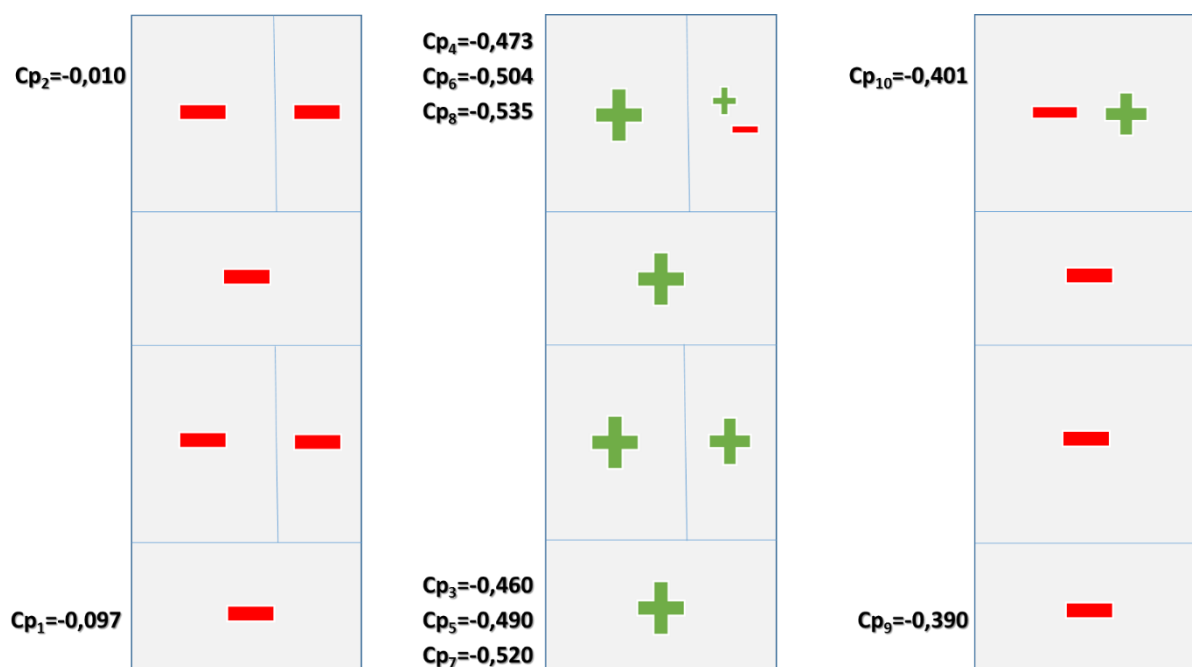


Figura 31 - Fluxo horizontal do caso 4 - incidência 217°.

Neste caso é facilmente identificado um padrão de circulação do ar: este vem do exterior através dos extremos da fachada e sai pela fachada SE. Para que tal aconteça, o ar tem de sair dos compartimentos de NE e SO em direção à secção central, tal como indicado na figura.

## 12.7 O edifício e a orientação das fachadas

A orientação das fachadas faz toda a diferença no padrão de circulação do ar dentro da fachada de dupla pele. De acordo com o que já foi exposto até aqui, é claro que a variação do volume, a radiação incidente ou o vento desempenham papéis muito importantes na variação da circulação do ar.

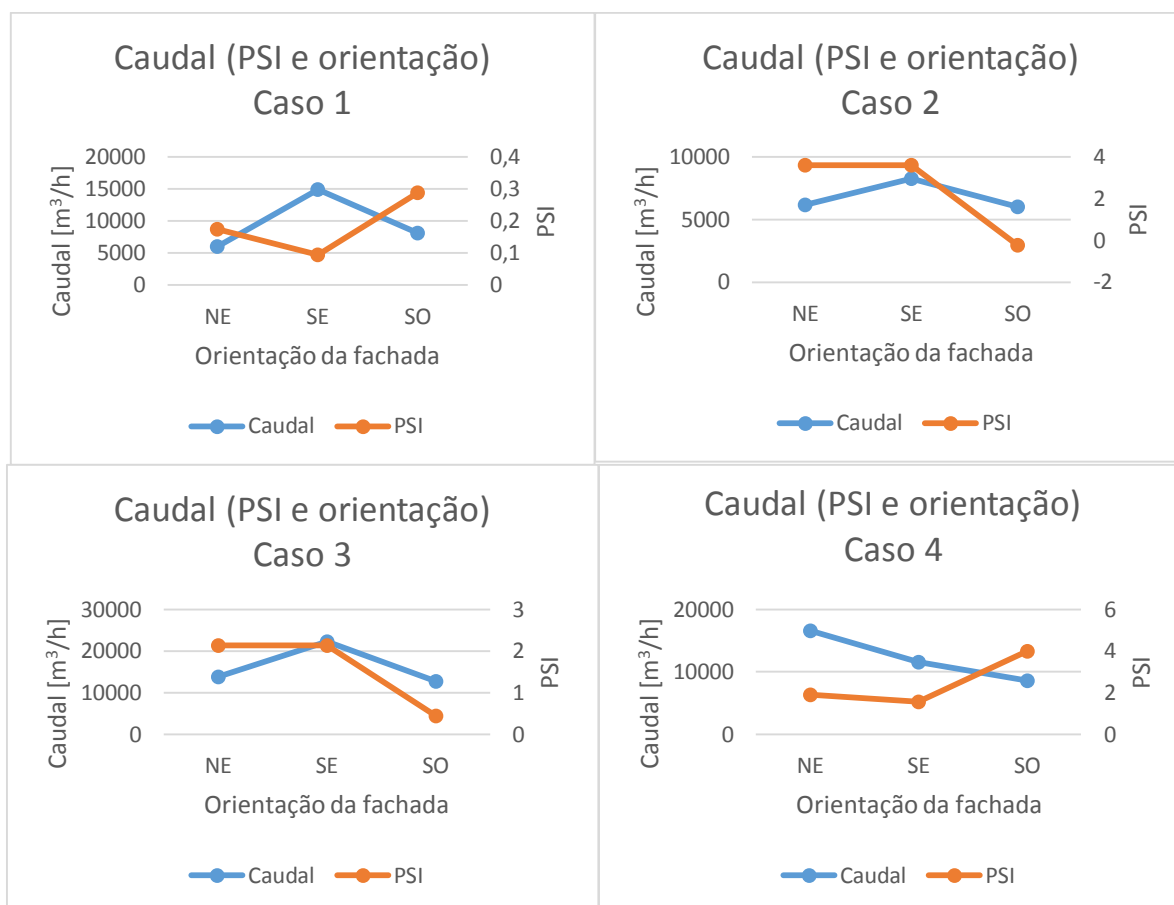


Figura 32 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada em função do PSI.

No primeiro caso, em que a irradiância domina, os valores do parâmetro PSI encontram-se sempre abaixo da unidade sendo que o caudal aumenta à medida que o valor de PSI diminui demonstrando o efeito da irradiância.

No segundo caso os perfis são praticamente coincidentes indicando a forte influência do vento sobre o caudal. Apesar de este ser um caso em que o vento é de SO, dá-se às 21:00 pelo que os níveis de irradiância são baixos e o vento domina, como seria de esperar.

No terceiro caso (vento de NO, 17:00 horas) os perfis são mais uma vez coincidentes e o valor de PSI é quase sempre superior à unidade. Os resultados obtidos são coincidentes com o que se esperava uma vez que o vento domina o caudal de circulação do ar.

Por último o parâmetro PSI é sempre superior à unidade, coincidente com um vento de NO mas, uma vez que o caso se dá às 9:30 horas os perfis não são tão aproximados devido ao efeito da irradiância. Esta faz com que na fachada NE o caudal seja mais elevado o que revela que ambos os caudais – eólico e térmico – se conjugam. Na fachada SO, onde o sol não incide a esta hora do dia, o caudal resultante diminui sendo composto maioritariamente por caudal eólico.

## 12.8 Validação dos resultados

A validação dos resultados baseia-se na comparação entre resultados do Ventil e dados de campanha. Neste caso a comparação efetuada é entre  $\Delta T$  resultante do Ventil e a diferença das temperaturas dos

dados de campanha. O  $\Delta T$  dos dados de campanha é dado pela diferença de temperatura entre um dado compartimento e o exterior. Não foi possível apresentar resultados relativos à fachada SO uma vez que os dados de campanha são insuficientes.

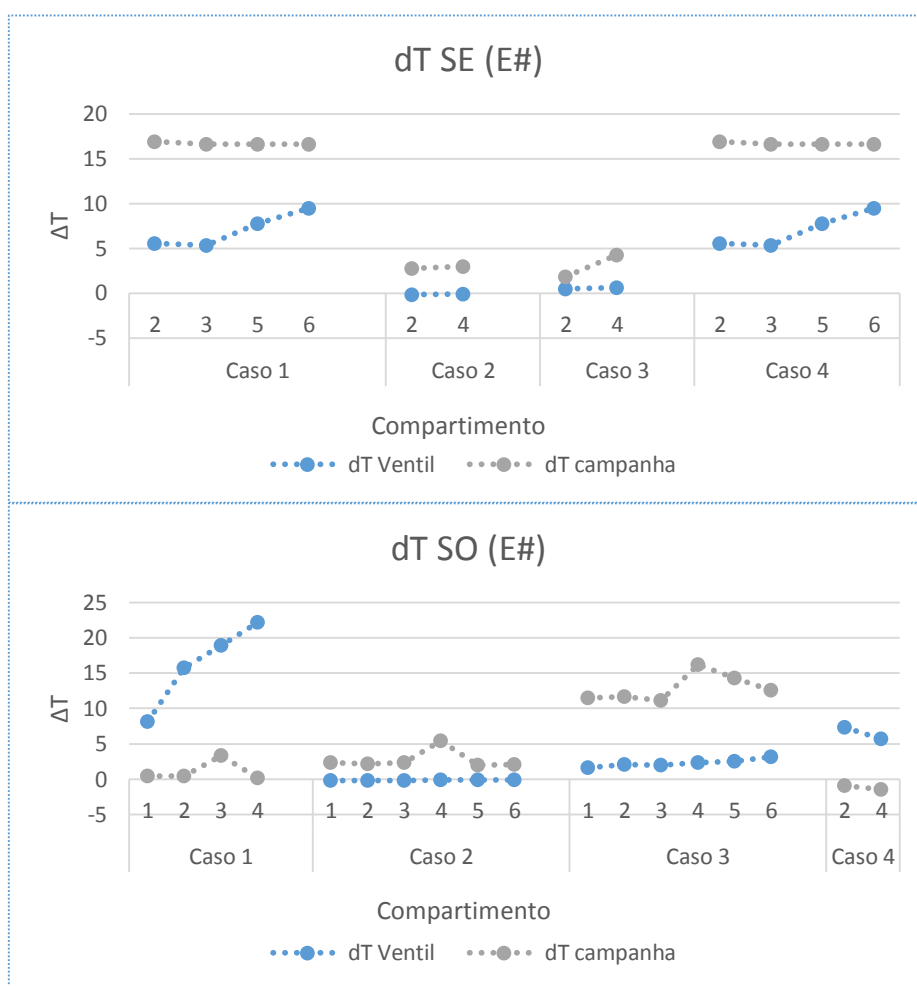


Figura 33 – Comparação dos  $\Delta T$  do Ventil e de campanha, em cada espaço da fachada por caso de estudo.

Pode concluir-se que os resultados apresentados são viáveis, uma vez que a diferença de temperatura entre estes e os dados medidos no edifício é pouco significativa. Apesar de existirem algumas falhas de registos para a fachada SE, foi efetuar uma comparação para alguns compartimentos apresentada na figura 33. A maior diferença de resultados verifica-se nos casos 1 e 4 que decorrem no período da manhã. Neste período é quando há maior efeito da irradiância e a diferença pode ser explicada pela não contabilização do calor acumulado na fachada.

Para a fachada SO as desigualdades são verificadas nos casos 1 e 3. No caso 3 a diferença de amplitude em que os resultados do Ventil são inferiores aos dados de campanha deve-se também à não contabilização do calor acumulado que, ao final da tarde atinge valores consideráveis principalmente na fachada SO onde a irradiância é mais intensa neste período.

De seguida serão apresentados os resultados relativos a compartimentos atrás do sombreador.

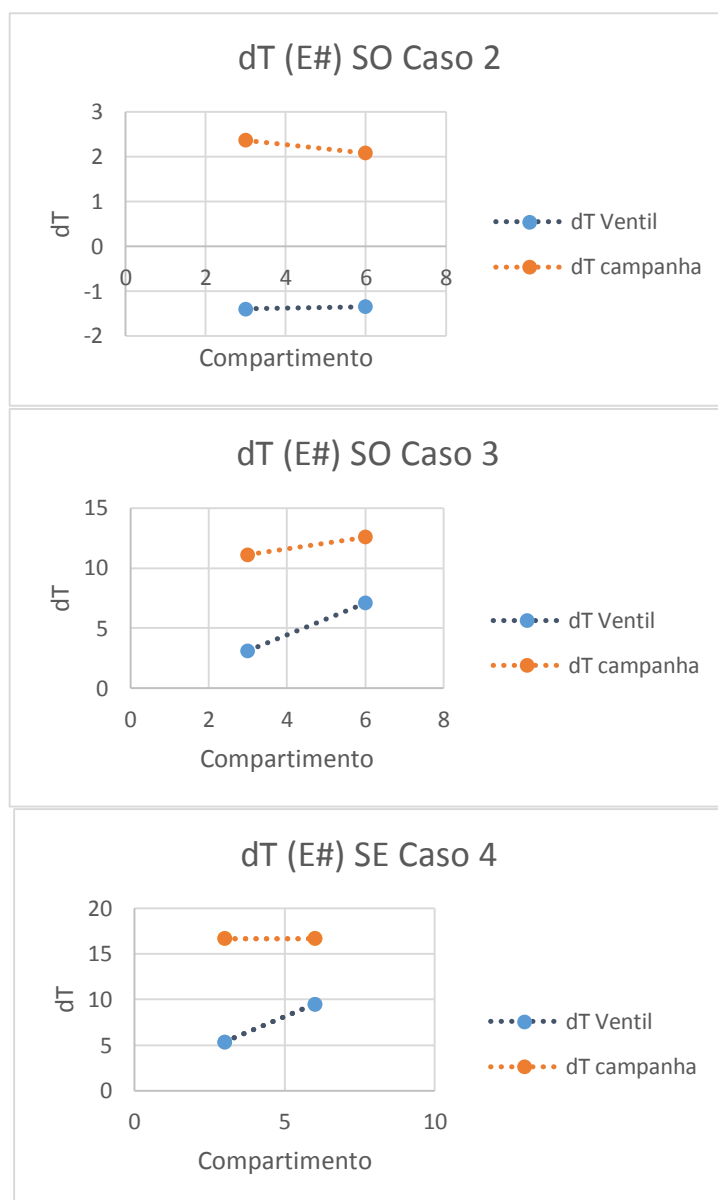


Figura 34 - Variação da temperatura em relação à temperatura exterior em cada espaço da fachada atrás do sombreador.

Este foi o padrão apresentado nos compartimentos atrás do sombreador. Os perfis são bastante semelhantes, no entanto, apresentam uma diferença de amplitude. Porém esta pode ser considerada pouco significativa devendo-se à não contabilização do calor armazenado na fachada bem como à inércia térmica dos seus componentes.

### 13. Discussão dos resultados

Como referido ao longo de todo o trabalho, os dois fatores responsáveis pela ventilação da fachada são a irradiância e o vento. É da conjugação de ambos que resulta o caudal de circulação do ar.

Os resultados mostram que a irradiância cria um gradiente de temperaturas dentro da fachada promovendo um caudal ascendente, tanto em dias de céu limpo como de céu nublado. Apesar do seu efeito ser bastante notório em determinadas condições, é facilmente contrariado pelo efeito do vento. O efeito do vento é mais ou menos moderado consoante a sua velocidade e os coeficientes de pressão de cada abertura. Estes coeficientes estão dependentes do ângulo de incidência do vento, pelo que os casos de estudo apresentados revelam os efeitos fortes do vento quando este é de NO (Figura 23 - Variação do caudal na abertura inferior de cada fachada em função da velocidade do vento.). Uma vez que o estudo aqui apresentado diz respeito a toda a fachada, o modelo aproxima-se da realidade e torna-se

mais difícil isolar os tipos de caudais – ascendentes ou descendentes. Porém, verificou-se que quando a irradiância tem maior contribuição o caudal é ascendente mas, quando se verifica maior velocidade do vento e, caso os coeficientes de pressão assim o indiquem, o caudal é descendente.

De forma a avaliar melhor qual a influência de cada um dos fatores descritos no parágrafo anterior, apresentam-se os resultados relativos ao parâmetro de potência adimensional, PSI, que quando toma valores acima da unidade significa que o vento é o fator que condiciona fortemente a circulação do ar. Caso este parâmetro seja inferior à unidade quer dizer que a irradiância toma maior importância.

Verificou-se frequentemente o caso em que o vento é predominante, na maioria das situações, pelo fato de os coeficientes de pressão criarem um gradiente de pressão muito claro. Em muitos dos casos estudados o coeficiente de pressão da base da fachada era inferior ao do topo estabelecendo automaticamente um caudal contrário ao térmico. Verificaram-se algumas vezes caudais – térmico e eólico – coincidentes resultando num caudal total superior devido à junção de ambos.

Quando foram verificados caudais ascendentes, existe um gradiente de temperatura crescente da base para o topo. O contrário acontece quando o caudal é descendente (Figura 26 - Variação vertical da temperatura em relação à temperatura exterior). Verificou-se igualmente que, mesmo durante a noite, a diferença de temperatura entre o interior e o exterior é diferente de zero, o que nos indica que existe libertação de calor na fachada durante a noite. Este calor é acumulado durante o dia e libertado pela noite devido à inércia térmica dos materiais que constituem a construção. Esta libertação de energia no período noturno tem pouca contribuição para o caudal – quando comparada com o vento – mas revela que a fachada de dupla pele pode ser realmente utilizada como zona de permuta de calor. Isto é, como referido no capítulo 2.2, a fachada de dupla pele pode ser utilizada para arrefecer o interior do edifício durante a noite enviando o ar quente para fora no Verão, ou para aquecer o edifício no Inverno através da admissão de ar aquecido.

Na Figura 27 pode comprovar-se que a temperatura dentro da fachada é controlada também através do caudal. Quanto maior for este último, menor será a variação de temperatura na fachada. Tal deve-se ao fato de o ar ficar menos exposto aos efeitos da irradiância por permanecer menos tempo no interior da fachada.

Como mencionado anteriormente, o efeito do vento torna-se difícil de avaliar pois para uma determinada incidência os coeficientes de pressão criam diferentes padrões de circulação e caudais distintos. Na Figura 25 é possível ver que o caudal vai estar dependente do  $\Delta p$  térmico, quer seja devido diretamente à irradiância como ao calor libertado devido à inércia térmica. Os caudais eólico e térmico variam consoante a orientação da fachada e a hora do dia devido à incidência de radiação – que para uma fachada é mais no período da manhã e para outra será no da tarde – e aos coeficientes de pressão que variam com a direção do vento. Foi assim possível estabelecer a relação entre a hora do dia e as diferentes fachadas no que diz respeito à irradiância: a fachada NE é favorecida no início do dia, a SE ainda no período da manhã e a SO no período da tarde. A temperatura interior da fachada é influenciada por esta mesma relação.

Apesar de existir uma grande variabilidade nos resultados obtidos é bastante fácil estabelecer um padrão de circulação do ar vertical e horizontal. Isto é, nos dias em que a irradiância é baixa, por norma, o caudal é controlado pelo vento e, obviamente, pelos coeficientes de pressão das aberturas da fachada. São estes que definem tanto a circulação vertical (caudal ascendente ou descendente) como a circulação horizontal (ao longo das três frentes). Quando a irradiância é dominante, o caudal vertical é geralmente ascendente devido ao efeito de impulsão. Por norma, a circulação entre as fachadas continua a ser definida pelas diferenças de pressão estabelecidas pelo vento. É também perceptível através dos resultados que a frente de fachada SE é a mais afetada pelo efeito da irradiância pois é a que permanece mais horas durante o dia com forte incidência de radiação solar.

Relativamente ao caudal horizontal entre as três frentes de fachada podem estabelecer-se padrões de circulação do ar como representado nas figuras 28 a 31. Este padrão de circulação é, por norma, estabelecido pelos coeficientes de pressão distribuídos pelo edifício. A circulação vertical também depende dos coeficientes de pressão, estabelecendo padrões verticais de circulação do ar. Acontece que ambos os caudais – vertical e horizontal – se complementam. As exceções verificadas à forma como

este fluxo de ar se estabelece – tanto horizontal como verticalmente – devem-se ao efeito da irradiância que também se faz sentir.

Apesar de não se ter abordado individualmente a variabilidade sazonal, é perceptível através das várias simulações efetuadas, que os perfis são bastante semelhantes ao longo das diferentes estações do ano. Não ocorre um padrão específico de cada estação do ano pois estas dependem de muitas outras variáveis que mudam consoante a hora do dia. Só seria possível estabelecer uma relação clara através do estudo de um número de casos muito elevado.

A validação dos resultados foi realizada com base nos gradientes de temperatura. Verificou-se em grande parte dos casos uma boa aproximação do modelo ao caso real (Figura 33 e Figura 34). Por outro lado, a validação dos resultados, em alguns casos, foi prejudicada pela falta de dados de campanha. Os resultados que não estão totalmente em concordância com os dados medidos devem-se também às aproximações efetuadas de forma a utilizar o modelo numérico. Exemplo disso são os cálculos efetuados para os dados do vento (envolvem características do terreno urbano que envolve o edifício). Existe também um erro associado ao facto de se terem considerado as ligações entre as fachadas todas iguais, quando, nos extremos do edifício as medidas não são exatamente como descritas. E, para além disso existem também os erros associados aos cálculos da irradiância (dias de céu limpo e céu nublado). Todas estas pequenas imprecisões contribuem, de uma forma ou de outra, para o afastamento dos resultados à situação real. Apesar de tudo, no geral, no modelo constitui uma boa aproximação ao edifício real.

## 14. Conclusão

Apesar de os edifícios de fachada de dupla pele serem já um modelo bastante estudado, foi possível estabelecer com este trabalho complexas relações entre os efeitos do vento e da irradiância numa construção deste género. De notar que a maior parte dos estudos efetuados anteriormente dizem respeito a climas bastante diferentes do clima temperado que aqui se estuda.

A fachada de dupla pele, do tipo corredor e modo de cortina exterior, ventilada naturalmente, revela claramente determinados padrões de circulação. A irradiância vai desempenhar um efeito bastante notório promovendo sempre um caudal ascendente. O caudal térmico, quando a irradiância tem maior representatividade, vai acompanhando as suas variações ao longo do dia. Ao ter muita radiação incidente durante o dia, chega mesmo a afetar o caudal noturno através da inércia térmica dos materiais.

Ainda assim, o caudal eólico, controlado pelos coeficientes de pressão ao longo da fachada e pela velocidade do vento, define a circulação do ar de uma forma muito mais complexa. Dependendo da fachada em questão e do ângulo de incidência do vento, as diferenças de pressão ao longo do edifício vão produzir caudais de circulação muito mais diversificados. Pode, no entanto, definir-se facilmente um padrão de circulação ao longo das três frentes em estudo. Com a junção do caudal térmico é também facilmente definido um movimento vertical.

O programa de simulação Ventil revelou mais uma vez ser uma ferramenta muito útil em estudos deste tipo. Os resultados que devolve permitem uma visão alargada da forma como funciona este tipo de fachada permitindo estabelecer relações entre as diferentes variáveis envolvidas. No entanto, demonstrou ter algumas limitações no que diz respeito à interface do utilizador bem como à velocidade de processamento. Coloca também algumas dificuldades quanto à forma de introduzir os dados e revela ser muito sensível às estimativas iniciais atribuídas quando o modelo apresentado tem já alguma complexidade.

No futuro, seria de relevância melhorar o modelo no que diz respeito às extremidades da fachada estudada bem como alargar o estudo a outros pontos em altura. Através de um modelo mais bem elaborado e uma melhor utilização do programa de cálculo, com um maior número de simulações, pode ser feito um estudo mais preciso e avançado de forma a obter conclusões mais sólidas.



## 15. Referências

- Alexandre, José. 1999. “Análise do método utilizado pelo RCCTE para o cálculo dos ganhos solares úteis na estação de aquecimento”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Boake, Terri. 2014. “Hot Climate Double Facades: A Focus on Solar Avoidance”. Retrieved Setembro 2014. (<http://www.slideshare.net/tboake/hot-climate-double-facades-a-focus-on-solar-avoidance>)
- Battle McCarthy – Consulting Engineers and Landscape Architects. “Research & Development – Double skin technology”. Retrieved Dezembro 2014. (<http://www.battlemccarthy.com/datasheets/Research/double%20skin.pdf>)
- D. Cóstola, B. B. J. L. M. H. 2009. “Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs.” Building Physics and Systems, Eindhoven University of Technology.
- FACAL 2006. “Fachada\_Norfin.” In Planta da fachada.
- FACAL 2012. “FACAL.” Retrieved December 2012 (<http://www.facal.pt/?page=1&lang=pt>)
- FACAL n.d. “Fachada Dupla Pele para Clima do Sul da Europa.” Congresso de Construção Metálica e Mista.
- Ferreira, Cláudio R. M. 2013. “Avaliação do funcionamento de uma fachada de dupla pele por processos de ventilação natural”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Google. 2015. “Google Maps.” (<http://maps.google.pt/>).
- Gonçalves, Helder, Graça, João M., 2004. “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”. Retrieved Novembro 2014 (<http://www.lneg.pt/download/4117/Conceitos%20Bioclim%C3%A1ticos.pdf>).
- Harrison, K., & M.-B. T. 2003. “The Tectonics of the Environmental Skin.” University of Waterloo, School of Architecture.
- Heiselberg, P. 2008. Challenges in Performance Assessment of Responsive Building Elements. e-nova Internationaler Kongress 2008: Intelligente Gebäude - Responsive Buildings and Elements. Burgenland. ([http://vbn.aau.dk/en/publications/challenges-in-performance-assessment-of-responsive-building-elements\(9ea2e210-e877-11dd-b0a4-000ea68e967b\).html](http://vbn.aau.dk/en/publications/challenges-in-performance-assessment-of-responsive-building-elements(9ea2e210-e877-11dd-b0a4-000ea68e967b).html)).
- Mateus, Nuno A. M. 2012. “Validação de modelos de simulação térmica num edifício de dupla pele sem climatização”. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- McLoughlin, T., Laramée, Robert S., Zhang, Eugene. “Constructing Streak Surfaces for 3D Unsteady Vector Fields”. Retrieved Novembro 2014 (<http://cs.swan.ac.uk/~cstony/research/streaksurfaces/mcloughlin10streaksurfaces.pdf>).
- Norfin. 2011. “Office Park Expo.” Norfin. Retrieved 2013 (<http://www.norfin.es/pt/investimento-efundos/fundos-representativos/Office-Park-Expo/28/>).
- Norfin. 2012. “Norfin.” Norfin. Retrieved December 2012 (<http://www.norfin.pt/pt/>).
- Nuno Leónidas Arquitectos. “Arquitectura Ibérica, Office Park Expo”. Retrieved Dezembro 2014 (<http://www.nla.pt/files/ai33low.pdf>)

- Orme, Malcom, Artin Liddament, and Andrew Wilson. 1998. "AIVC Technical Note 34." Technical Note, Air Infiltration and Ventilation centre.
- Panão, Marta O. 2010. "Heat Transfer in Buildings – Climate". Documento de apoio à aula, Faculdade de Ciências – Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Peixeiro, Pedro M. D. 2009. "Simulação Térmica de uma Fachada de Dupla Pele com Ventilação Natural". Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, ISEL, Lisboa.
- Perino, Marco. 2008. "State-of-the-art Review, Vol.2A. Responsive Building Elements." Review, Aalborg University.
- Poirazis, Harris. 2006. "Double Skin Façades: A Literature Review." SHC, Lund.
- Regazzoli, Aaron. 2014. "'Seeing Double' – Part II The Role of a Double-Skin Facade in Energy Consumption". Retrieved Novembro 2014. (<http://www.fenestrapro.com/seeing-double-part-ii-the-role-of-a-double-skin-facade-energy-consumption/>).
- Rodrigues, António M., António C. Piedade, and Ana M. Braga 2009. "Térmica de Edifícios." Pp. 86-87 1<sup>st</sup> ed. Amadora.
- Saraiva, J. A. G., J. D. Delgado, and A. R. J. Borges. Novembro de 1985. "Um Programa de Cálculo Automático (PCA) de Ventilação Natural: VENTIL.FOR." Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Simiu, E., Scanlan, R. H., 1996. "Wind Effectes on Structures: Fundamentals and Applications to Design.", John Wiley & Sons
- Silva, Fernando M. d. 2003. "Ventilação Natural de Edifícios. Turbulência Atmosférica." PhD Thesis, IST, UTL, Lisboa.
- Silva, Fernando M. d. 2012. "Aerodinâmica: Camada Limite Atmosférica." Documento de apoio à aula, Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Silva, Fernando M. d. 2012. "Aerodinâmica: Ventilação Natural." Documento de apoio à aula, Faculdade de Ciências - Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Selkowitz, Stephen. 2011. "High Performance Windows and Glazings Technologies, Systems and Tools in the U.S.". Workshop presentation, IEA Building Envelope Technologies and Policies Workshop.

## 16. Anexos

### 16.1 Anexo 1: Coeficiente $c_p$ bibliografia

